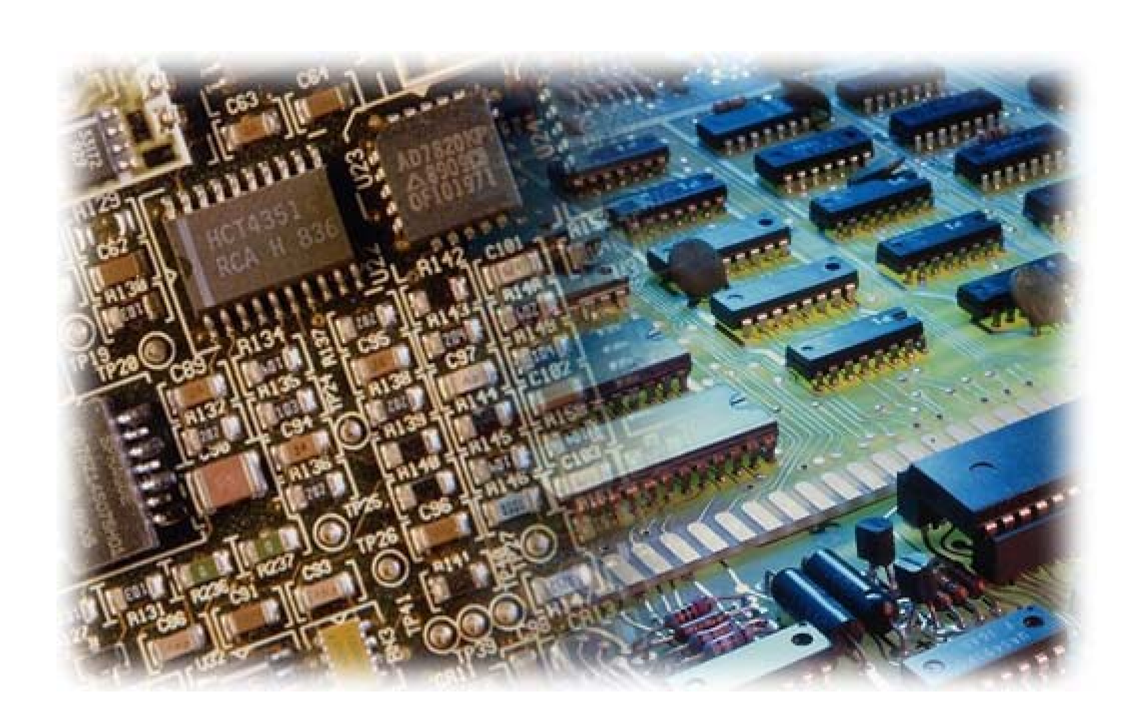


المملكـة العربيــة السـعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات صناعية وتحكم

إلكترونيات القوى

٢٤١ الك



مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي، لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " إلكترونيات القوى " لمتدربي قسم" إلكترونيات صناعية وتحكم " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تمهيد

يمكن وصف علم إلكترونيات القوى بأنه العلم الذي يبحث في تطبيق عناصر إلكترونيات القوى المختلفة مثل الثايرستورات في جميع التطبيقات الصناعية والعملية المختلفة.

تلعب إلكترونيات القوى دوراً رئيسياً في تقدم وتطبيقات التقنية ونتيجة للحاجة الماسة والمتزايدة للتحكم في معدات القوى الكهربية والتي تزايدت بتطوير عناصر ودوائر القوى وطرق التحكم الخاصة بها والتي سوف تتزايد مع احتمال تطبيقها في أنظمة أخرى جديدة.

قد تم التقدم الهائل في علم إلكترونيات القوى منذ نهاية الثمانينات وبداية التسعينات من القرن الماضي نتيجة للتقدم الهائل الذي قد حدث في المعالجات الدقيقة من حيث سرعتها الفائقة ومرونتها. حيث يمكن أن تتم عملية إغلاق وفصل معظم العناصر الالكترونية المختلفة باستخدام هذه المعالجات الدقيقة حيث يؤدي استخدام هذه المعالجات إلى تقليل كبير للدوائر التماثلية المستخدمة لعمل التحكم المطلوب وأيضا لتقليل حجم الدوائر المستخدمة.

الهدف الرئيسي من إعداد هذا الكتاب هو جعل المادة العلمية الخاصة بإلكترونيات القوى تظهر بالنسبة للطالب التقني بصورة متيسرة وللمهتمين بمعرفة ودراسة هذا العلم كمرحلة يمكن أن ينطلقوا بعدها بالاستعانة بمراجع أخرى متقدمة. وقد تم الاهتمام في هذا الكتاب بدراسة بعض العناصر الإلكترونية والتي تكون وظيفتها عبارة عن مفاتيح لفصل وغلق الدوائر الإلكترونية وتطبيق هذه العناصر لعمل التحكم المطلوب لدوائر إلكترونيات القوى.

يتكون هذا الكتاب من ٤ وحدات وهي كالتالي:

الوحدة الأولى:

تختص الوحدة الأولى بدراسة عناصر اشباة الموصلات المستخدمة بدوائر إلكترونيات القوى وقد تم التركيز على بعض العناصر كالثايرستور والترياك وقد تم أيضا دراسة بعض دوائر الإشعال الخاصة لقدح هذه العناصر الإلكترونية بجانب دراسة طرق الحماية اللازمة والمطلوبة لهذه العناصر.

الوحدة الثانية:

تم دراسة بعض دوائر الموحدات المحكومة أحادية الطور حيث تحول هذه الموحدات جهد المصدر المتناوب وله قيمة فعالة ثابتة إلى جهد مستمر متغير حيث يتم التحكم فيه عن طريق دوائر إشعال المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في هذه الدوائر.

الوحدة الثالثة:

تم دراسة بعض مقطعات التيار المستمر حيث تهدف هذه المقطعات إلى تحويل جهد المصدر الثابت المستمر إلى جهد مستمر متغير القيمة ويمكن التحكم فيه عن طريق التحكم في دوائر إشعال المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في دوائر المقطعات وذلك بالتحكم في زمن فصل وغلق المفاتيح الإلكترونية.

الوحدة الرابعة:

تم دراسة بعض دوائر العواكس أحادية الطور حيث تستخدم هذه العواكس لتحويل جهد المصدر المستمر إلى جهد متناوب ثابت أو متغير القيمة حيث يتم التحكم في هذا الجهد عن طريق التحكم في زمن إغلق وفصل المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في هذه العواكس وأيضا بالتحكم في قيمة التردد المطلوب لفصل وغلق هذه المفاتيح الإلكترونية.



المملكة العربية السعودية

المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات القوى

عناصر إلكترونيات القوى

عناصر إلكترونيات القوى

١

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة يجب أن يكون الطالب ملما بالتالي :

- تعريف الثايرستور
- عمل الثايرستور كموحد سليكوني محكوم
- معرفة الخواص الإستاتيكية للثايرستور
- حماية الثايرستور
- دوائر الإشعال الأساسية الخاصة بالثايرستور
- عمل الترياك و الدياك وخواصهما الإستاتيكية

مقدمة:

تستعمل في دوائر إلكترونيات القوى عدة أنواع من عناصر أشباه موصلات نذكر منها :

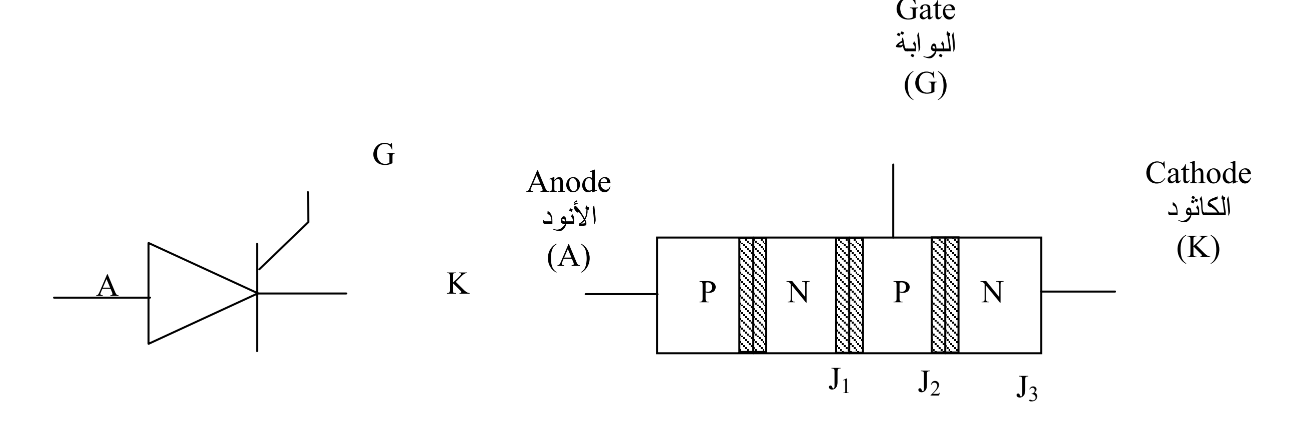
- الدايود Diode
- ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية BJT
- ترانزستور البوابة ثنائية القطبية IGBT
- الموسفت MOSFET
- ثايرستور Thyristor
- ترياك Triac
- دياك Diac
- ترانزستور وحيد الوصلة UJT.

سوف نتطرق في هذه الوحدة إلى دراسة بعض هذه العناصر و هي: الثايرستور، الترياك و الدياك حيث نتعرض أولاً إلى التركيب الفيزيائي لكل عنصر ثم شرح و رسم خواص كل عنصر و أخيرًا شرح مختلف الطرق المستخدمة لإشعال الثايرستور و الترياك مع ذكر بعض التطبيقات العملية لهذه العناصر.

الثايرستور Thyristor:

يعتبر الثايرستور واحداً من أقدم عناصر أشباه الموصلات semiconductors حيث تم تصنيعه لأول مرة في عام ١٩٥٧ من طرف شركة أمريكية General Electrics و هو الأكثر استعمالا في دوائر

إلكترونيات القوى. يتكون الثايرستور من أربع طبقات و له ثلاثة أطراف: الأنود أو المصعد Anode (A), الكاثود أو المهبط Cathode (K) و البوابة Gate (G) كما هو موضح في الشكل (١ -١).



الشكل (١ -١): تركيب و رمز الثايرستور

للثايرستور اسم آخر وهو موحد سليكوني محكوم Silicon Controlled Rectifier (SCR). أما بالنسبة للرمز المستعمل للدلالة على الثايرستور فهو يشبه الرمز المستخدم للدايود ولكن له طرف إضافي يسمى البوابة. يدل اتجاه السهم في الرمز على اتجاه التيار المار من خلال الثايرستور عندما يكون في حالة التوصيل ON state.

حالات الثايرستور States of a thyristor:

للثايرستور حالتان: حالة الانحياز الأمامي Forward biased state و حالة الانحياز العكسي أو الخلفي Reverse biased state. يقال عن الثايرستور أنه في الحالة الأولى عندما يكون جهد أنوده أعلى من جهد كاثوده. أما في الحالة العكسية فيكون الثايرستور في الانحياز العكسي (الخلفي).

خواص الثايرستور الإستاتيكية Static Characteristic of a thyristor:

للحصول على خواص الثايرستور الإستاتيكية لا بد من دراسة سلوك الثايرستور في حالتي الانحياز الأمامي و الخلفي.

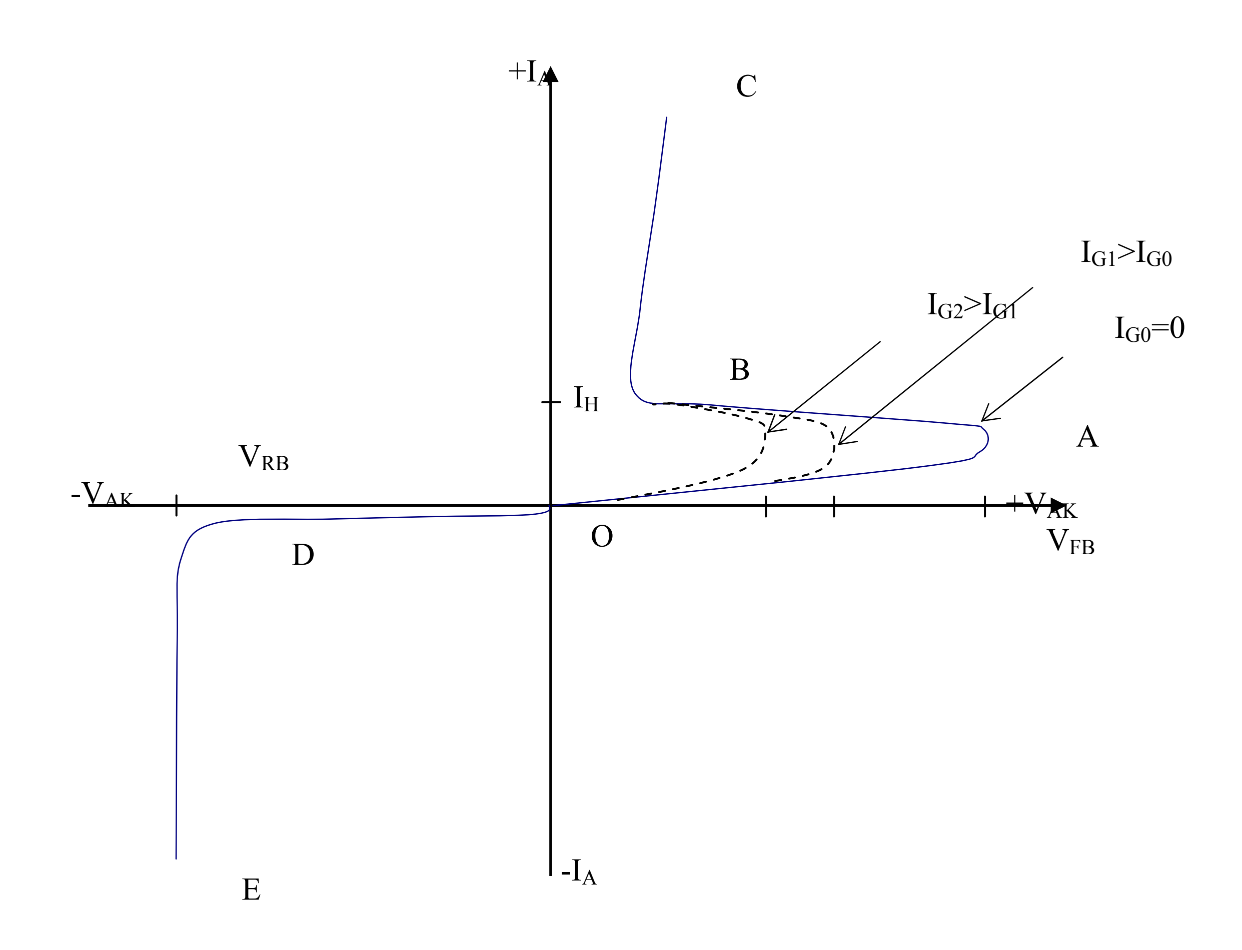
- ففي الحالة الأولى (الانحياز الأمامي) يكون جهد الأنود بالنسبة للكاثود موجباً و بالتالي تكون الوصلتان J_1 و J_3 في الانحياز الأمامي و الوصلة J_2 في الانحياز العكسي. تعيق الوصلة

الأخيرة مرور التيار من الأنود إلى الكاثود و تسمح لتيار صغير جدًا بالمرور من خلال الثايرستور. يعرف هذا التيار بتيار التسريب الأمامي Forward leakage current, و يصبح الثايرستور عندئذ في حالة القطع الأمامي Forward Blocking (off) state (الجزء OA في الشكل (١ -٢)).

إذا ازداد جهد الأنود بالنسبة إلى جهد الكاثود إلى أن يصل إلى قيمة كبيرة جدًا تدعى بقيمة جهد الانهيار الأمامي Forward Breakdown Voltage فإن الوصلة J_2 تتكسر، و يحدث انخفاض مفاجئ في مقاومة الثايرستور حيث تصبح قيمتها صغيرة مما يؤدي إلى مرور التيار عبر الثايرستور من الأنود إلى الكاثود و بذلك نحصل على حالة التوصيل الأمامي On State (الجزء BC في الشكل (١ -٢)). تقل قيمة جهد الانهيار الأمامي والذي يحصل عنده انكسار الوصلة J_2 مع زيادة تيار البوابة و بذلك يمكن القول على أن تطبيق النبضة في البوابة يسهل عملية إشعال الثايرستور. يجب الإشارة هنا إلى أنه بعدما يكون الثايرستور في حالة التوصيل ليس لدى البوابة أي تأثير على عمل الثايرستور أو بعبارة أخرى يستمر الثايرستور في التوصيل حتى ولو فصلنا البوابة. فالطريقة المستعملة لتوقيف الثايرستور عن العمل هي التقليل في التيار المار من خلال الثايرستور إلى أن يصل إلى قيمة أقل من قيمة تيار الإمساك 'I_H' Holding current.

- أما في الحالة الثانية (الانحياز العكسي) يكون جهد الأنود بالنسبة للكاثود سالب وبالتالي تكون الوصلة J_2 في الانحياز الأمامي و الوصلتان J_1 و J_3 في الانحياز العكسي. تقاوم الوصلتان الأخيرتان مرور التيار من الكاثود إلى الأنود و لا يمر سوى تيار صغير جدًا يسمى بتيار التسريب العكسي Reverse leakage current ذي قيمة أقل بكثير من قيمة تيار التسريب الأمامي (الجزء OD في الشكل (١ -٢)).

- إذا ازداد جهد الكاثود بالنسبة للأنود بقيم موجبة إلى أن يصل إلى قيمة تدعى بقيمة جهد الانهيار العكسي يحصل انهيار الثايرستورAvalanche فيتلف و لا يعد صالحًا للاستعمال مرة أخرى (الجزء DE في الشكل (١ -٢)).

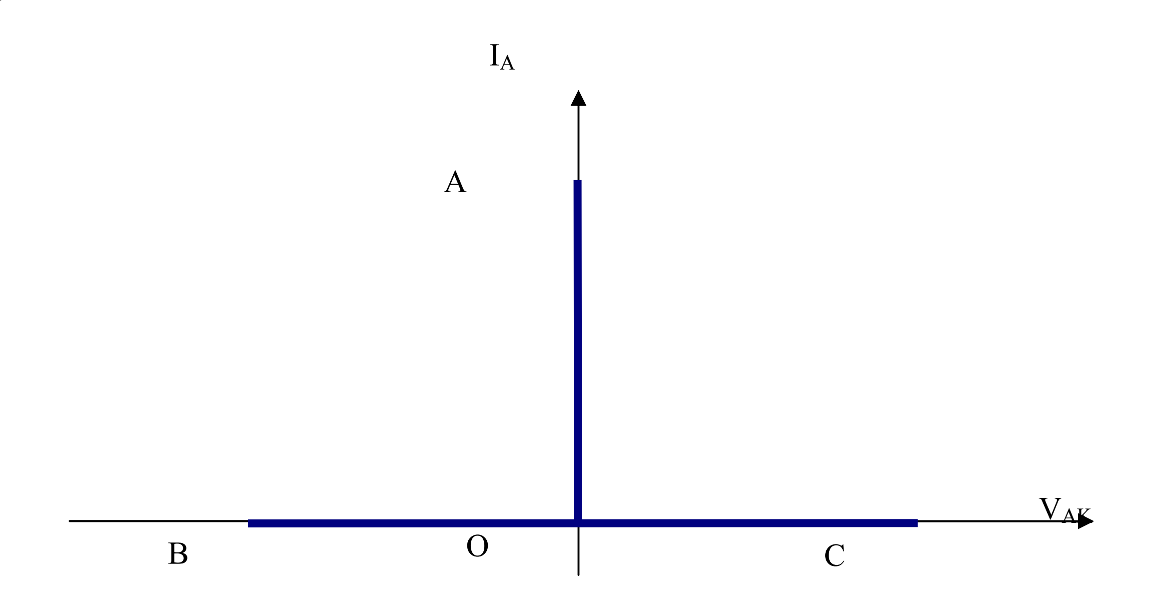


الشكل (١ -٢): خواص الثايرستور الأستاتيكية

الخواص المثالية للثايرستور Ideal characteristic of a thyristor:

عندما يكون الثايرستور في حالة التوصيل يسلك سلوك مفتاح مغلق حيث يسمح للتيار بالمرور من الأنود إلى الكاثود (الاتجاه الموجب الافتراضي للتيار) و يصبح عندئذ الجهد على طرفيه مساويًا للصفر (الجزء OA في الشكل (١ -٣)).

أما عندما يكون الثايرستور في حالة القطع فيعمل عمل مفتاح مفتوح حيث لا يسمح لأي تيار بالمرور. وبالتالي يمكن القول أنه ليس هناك تيار التسريب في الحالات المثالية. أما الجهد على طرفيه فيمكن أن يكون موجبًا في حالة القطع الأمامي (الجزء OC في الشكل (١ -٣)) او سالبًا في حالة القطع العكسي (الجزء OB في الشكل (١ -٣)).



الشكل (١ -٣): الخواص المثالية للثايرستور

طرق إشعال الثايرستور Methods of triggering a thyristor:

توجد أربع طرق يمكن بواسطتها تشغيل الثايرستور و جعله في حالة التوصيل، بعض هذه الطرق نظامية و مستعملة كثيرًا في التطبيقات العملية و البعض الآخر غير نظامية و يجب تجنبها عند تصميم دوائر الإشعال.

الإشعال بالحرارة و الضوء Thermal and light triggering:

إن الزيادة في درجة حرارة الثايرستور أو تسلطه إلى حزمة ضوئية تؤدي إلى زيادة في عدد الإلكترونيات و الفجوات مما يسبب إشعال الثايرستور. يجب تجنب طريقة تعرض الثايرستور إلى درجة حرارة عالية لأنها يمكن أن تسبب فساد العنصر. يعرف الثايرستور الذي يتم إشعاله عن طريق الضوء بالموحد السليكوني المحكوم المثار بالضوء Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCR).

الإشعال بالجهد العالي High voltage triggering:

لقد ذكرنا سابقًا عند دراسة خواص الثايرستور أن عندما يصبح الجهد على طرفيه أكبر أو يساوي قيمة جهد الانهيار الأمامي يحصل تغير مفاجئ في مقاومة الثايرستور حيث تصبح قيمتها صغيرة ويسمح بمرور كل التيار من الأنود إلى الكاثود. يُنصح عمليًا تطبيق نبضة على البوابة لتفادي استخدام جهود عالية لإشعال الثايرستور.

الإشعال بمعدل الجهد المسلط $\frac{dv}{dt}$ triggering :

لقد افترض حتى الآن أن الجهد المطبق على الثايرستور يزداد بالتدرج. و لو سمح لهذا التغير بالزيادة بصفة مفاجئة فهذا يؤدي إلى إشعال الثايرستور دون الحاجة إلى استخدام طرق القدح المعروفة الأخرى. إن هذا النوع من الإشعال ضار للثايرستور، و يمكن تجنبه بتحديد معدل تغير الجهد الأمامي $\frac{dv}{dt}$ الذي يتراوح بين ٢٠ و ٢٠٠ فولت لكل ميكرو ثانية في الثايرستورات الاعتيادية.

الإشعال بالبوابة Gate triggering:

عندما يكون الجهد على طرفي الثايرستور موجباً (المربع الأول من الخواص) يكتفي أن نمرر عبر البوابة تياراً ذا قيمة كافية عادةً ما بين ٠,١ إلى ٥٠ ميلي أمبير وذلك بتطبيق جهد موجب بين البوابة والكاثود لجعله موصل.

دوائر إشعال الثايرستور Firing circuits of a thyristor:

لكي تنجح عملية قدح الثايرستور لابد أن تحقق دائرة الإشعال ما يلي:

- أن تطبق بين البوابة و الكاثود نبضة ذات قيمة كافية و زمن الصعود قصير،
- أن تنتج إشارة ذات عرض مناسب،
- أن تطبق النبضة على البوابة عندما يكون الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي فقط.

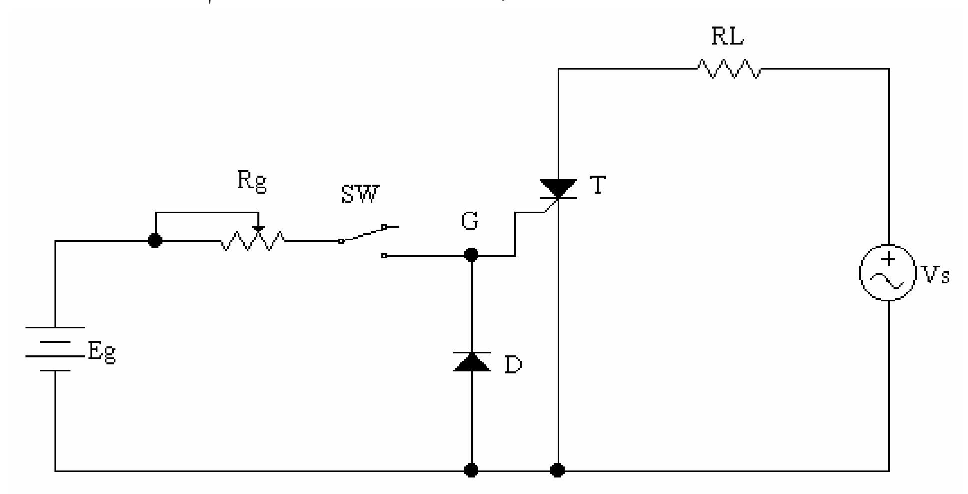
تنقسم دوائر الإشعال المستعملة عادةً لقدح الثايرستورات إلى ثلاث أنواع وهي:

- دوائر الإشعال بالتيار المستمر
- دوائر الإشعال بالتيار المتردد

- دوائر الإشعال بالنبضات

دوائر الإشعال بالتيار المستمر DC firing circuits:

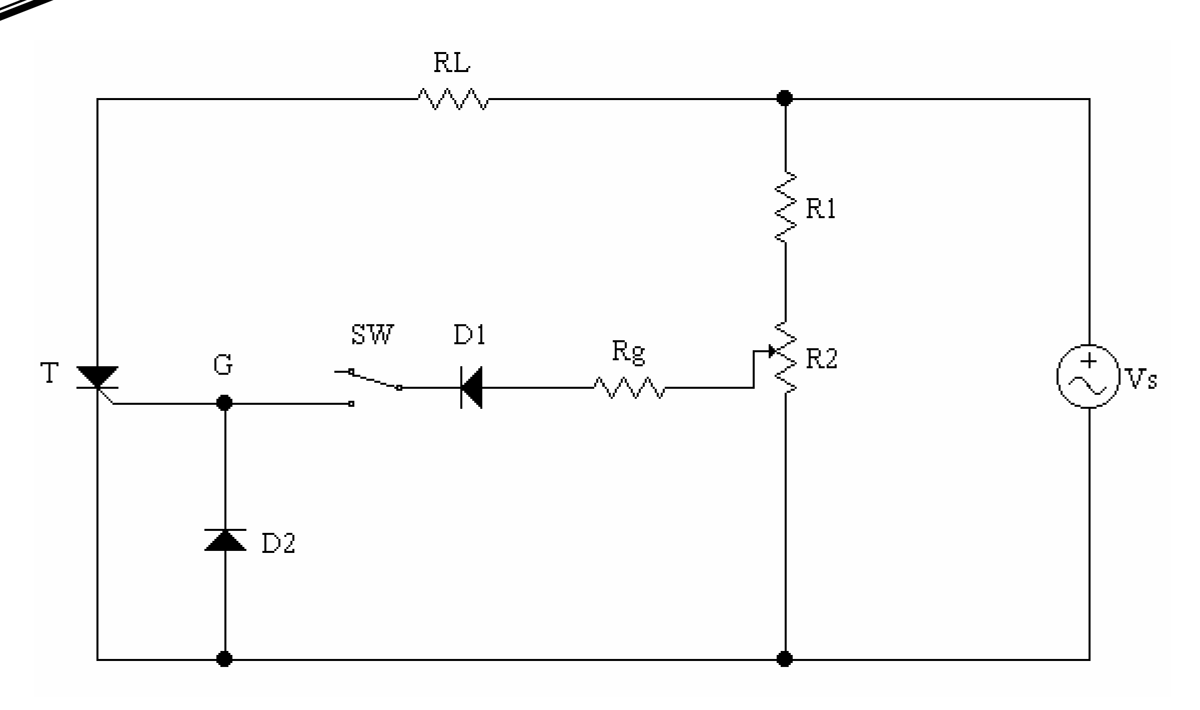
يوضح الشكل (١ -٤) مثال عن دائرة الإشعال بالتيار المستمر فهي تتكون من مصدر مستمر E_g، مقاومة متغيرة R_g و دايود D. لإشعال الثايرستور يغلق المفتاح SW فيمر تيار مستمر من المصدر إلى البوابة عبر المقاومة المتغيرة R_g. يعمل الدايود على حماية البوابة ضد أي جهد كهربائي عكسي. أما المقاومة المتغيرة فوظيفتها الأساسية هي التحكم في قيمة التيار المار في بوابة الثايرستور لتغيير زاوية الإشعال. والجدير بالذكر أن مثل هذا النوع من دوائر الإشعال تستهلك قدرة كهربائية مستمرة في دائرة البوابة مما يسبب طاقة مفقودة و عيب هذه الطريقة أيضًا أنها لا يمكن عزل دائرة الإشعال ذات القدرة المنخفضة عن الدائرة الرئيسية ذات القدرة العالية. و لهذه الأسباب لا تستخدم في التطبيقات الصناعية.



الشكل (١ -٤): دائرة الإشعال بالتيار المستمر

دوائر الإشعال بالتيار المتردد AC firing circuits:

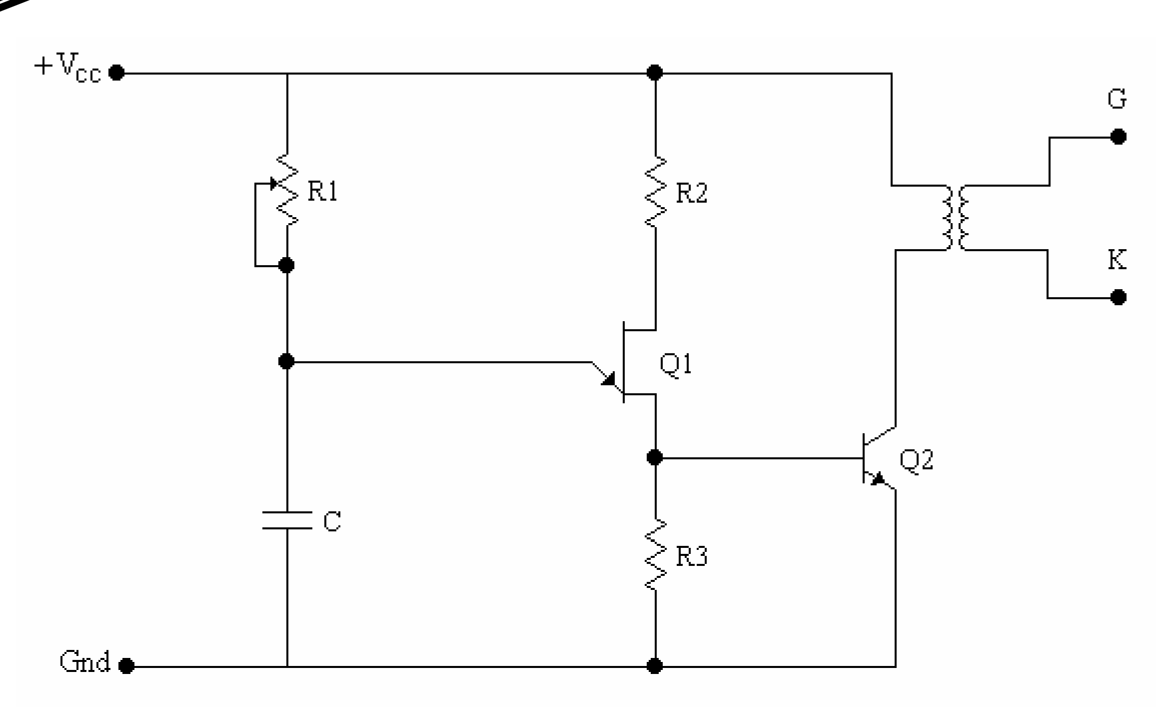
لتحكم في إشعال الثايرستورات المستعملة في دوائر القوى للتيار المتردد تستخدم نفس مصادر التغذية للحصول على إشارات القدح. يبين الشكل (١ -٥) مثال عن هذه الدوائر حيث تستعمل فيها المقاومتين R_1 و R_2 لتخفيض جهد الدخل المتردد إلى قيمة مناسبة لدائرة الإشعال بينما يقوم الدايود D بتوحيد الجهد على طرفي المقاومة R_2 لاستخدامها في تغذية بوابة الثايرستور. يتم التحكم في قيمة التيار المار بالبوابة بالتحكم في المقاومتين R_2 و R_g. من عيوب هذه الدائرة نذكر عدم إمكانية عزل دائرة القدرة عن دائرة الإشعال و أقصى قيمة لزاوية الإشعال يمكن الحصول عليها بواسطة هذه الدائرة هي ٩٠ درجة. كل هذا يفسر أسباب عدم استخدامها في التطبيقات العملية.



الشكل (١ -٥): دائرة الإشعال بالتيار المتردد

دوائر الإشعال بالنبضات Pulse triggering circuits:

لتخفيض القدرة المفقودة في بوابة الثايرستور تستعمل نبضة واحدة أو مجموعة من النبضات لإشعال الثايرستور. هذا يساعد على دقة تحديد لحظة الإشعال، كما يسمح أيضا بعزل الثايرستور عن دائرة الإشعال باستعمال محولات النبضة Pulse transformers. يوضح الشكل (١ -٦) دائرة إشعال مذبذب الاسترخاء المكونة من ترانزستور وحيد الوصلة Q_1 مع مقاومة متغيرة R_1 و مكثف C و ذلك لضبط القيمة الزمنية بين النبضات. يشحن المكثف عن طريق المقاومة المتغيرة R_1 حتى يصل الجهد على طرفيه إلى قيمة جهد الباعث العظمى V_p حيث ينهار الترانزستور وحيد الوصلة و بالتالي يمر تيار من خلال المقاومة R_2 مما يسبب بدوره توصيل لترانزستور Q_2 و توليد نبضات على الملف الثانوي لمحول النبضة.

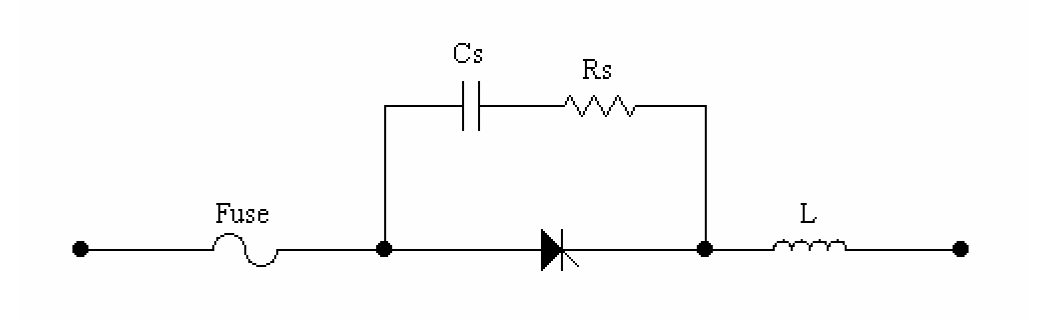


الشكل (١ -٦): دائرة الإشعال بالنبضات

حماية الثايرستور Thyristor protection:

إن درجة حرارة الثايرستور تميل إلى الإرتفاع عند الزيادة السريعة في الجهد او التيار مما يسبب فساد العنصر إن لم تُأخذ تدابير مسبقة لحمايته. تكون هذه الحالات العابرة في الجهد أو التيار عادةً ناتجة من عمليات قطع للتيار خاصة في الدوائر التي تحتوي على الملفات أو من فصل مصادر التغذية بسبب عوامل طبيعية كالرياح و الصواعق. يوضح الشكل (١ -٧) الأنواع الثلاثة من الحمايات المستخدمة في الثايرستور:

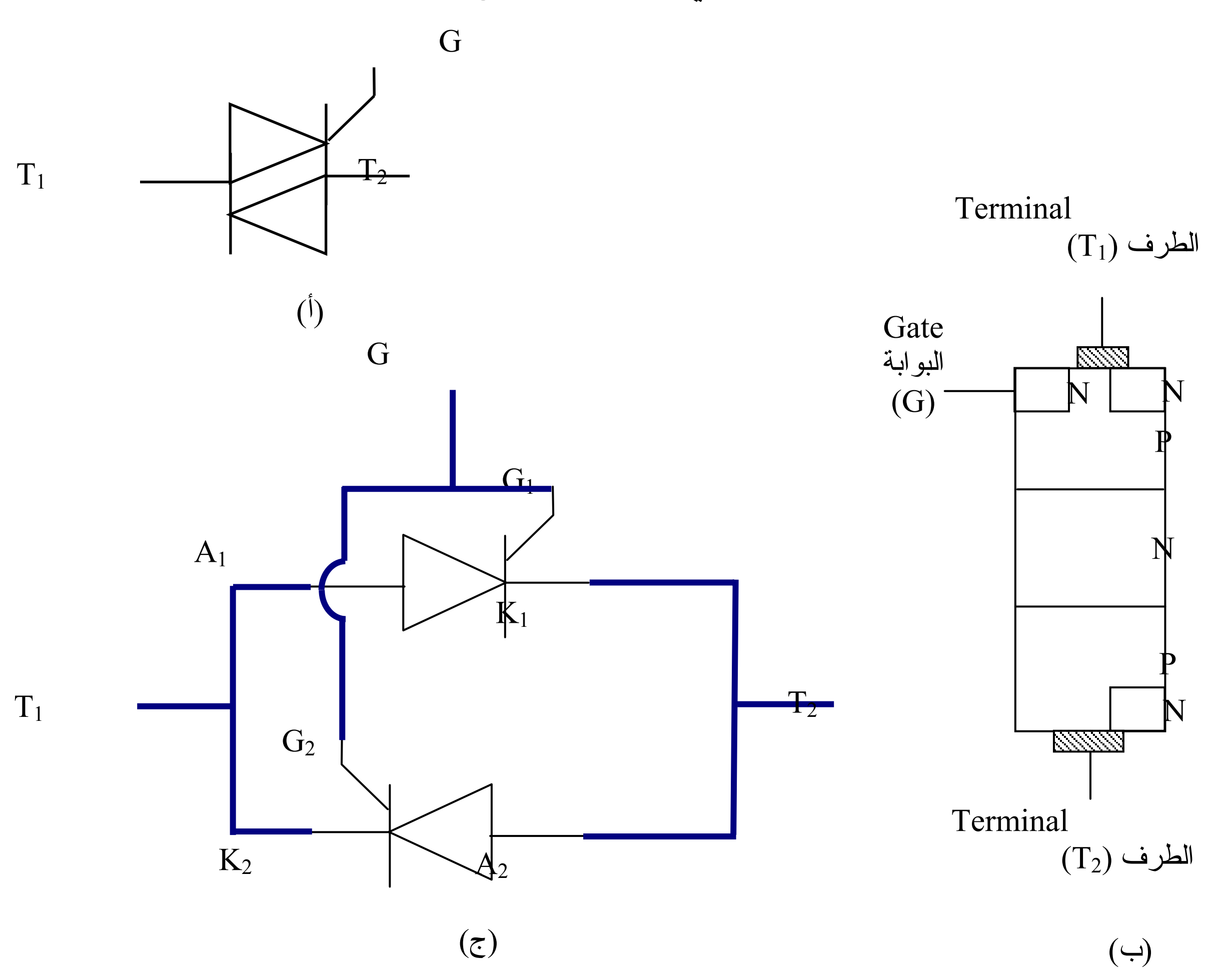
- الحماية ضد التيارات العالية باستعمال مصهر Fuse على التوالي مع الثايرستور. عند إختيار المصهر، يجب أن تكون القيمة المقننة للتيار المصهر أقل بقليل من القيمة العظمى للتيار الذي يتحمله الثايرستور.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في الجهد بتوصيل دائرة إمتصاص الصدمات Snubber circuit على التفرع مع الثايرستور. تتكون هذه الدائرة من مقاومة موصلة على التوالي مع مكثف.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في التيار باستخدام ملف على التوالي مع الثايرستور



الشكل (١ -٧): دائرة حماية الثايرستور

الترياك Triac:

الترياك هو عنصر شبه موصل متعدد الطبقات و يكافئ ثايرستورين موصلين على التوازي وبشكل عكسي أو بعبارة أخرى أن أنود الثايرستور الأول موصل إلى كاثود الثايرستور الثاني و كاثود الثايرستور الأول موصل إلى أنود الثايرستور الثاني كما هو موضح في الشكل (١ -٨).



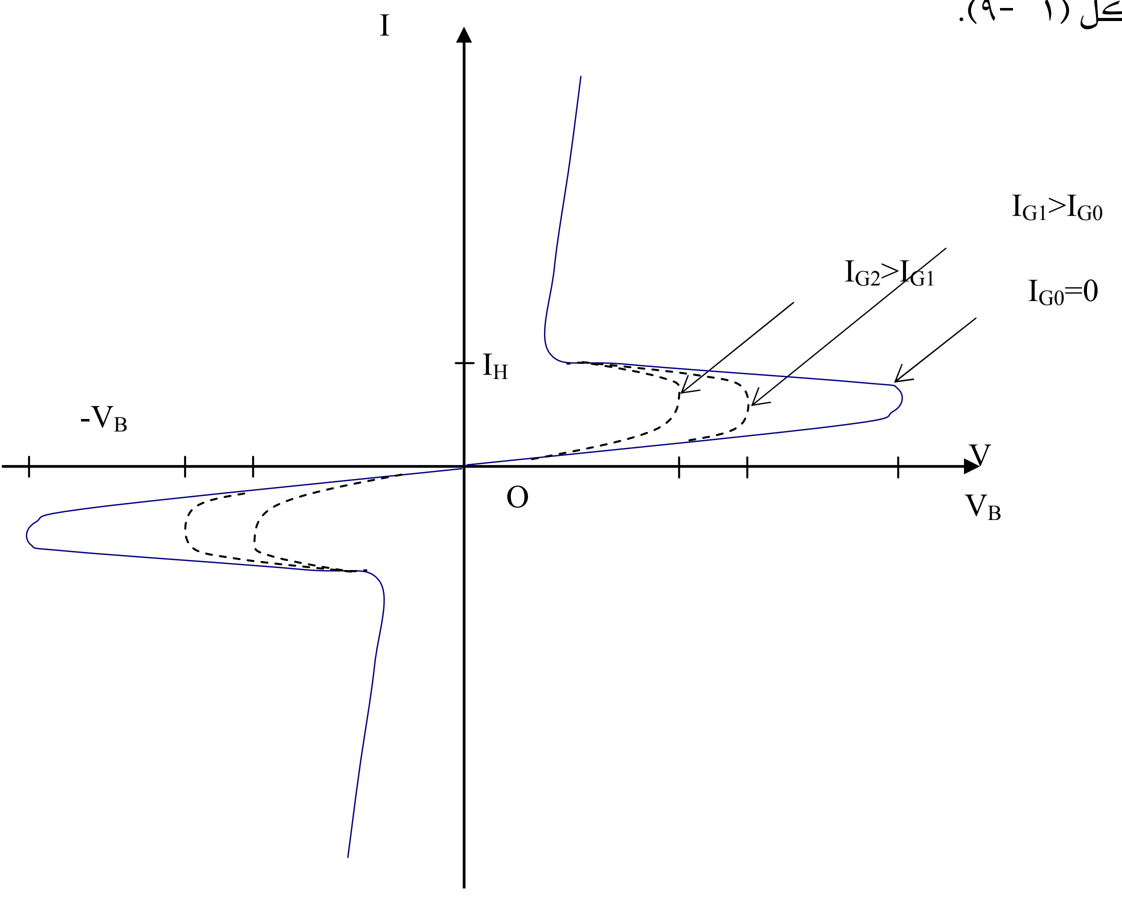
الشكل (١ -٨): الترياك (أ) الرمز (ب) التركيب (ج) الدائرة المكافئة

يبين نفس الشكل التركيب الطبقي للترياك و الرمز الخاص به. يوصل الترياك التيار في كلا الاتجاهين:

- من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 إذا كان جهد T_1 أعلى من جهد T_2 و طبقت إشارة الإشعال بين البوابة G و الطرف T_2.
- من الطرف T_2 إلى الطرف T_1 إذا كان جهد T_2 أعلى من جهد T_1 و طبقت إشارة الإشعال بين البوابة G و الطرف T_1.

يمكن إشعال الترياك أيضا بإشارة سالبة إلا أن حساسيته للإشارة الموجبة أفضل. يستخدم الترياك في عدة تطبيقات نذكر منها على سبيل المثال التحكم في سرعة محركات التأثيرية الثلاثية الأوجه و في الإضاءة و التسخين الكهربائي.

لسبب توصيل الترياك للتيار في كلا الاتجاهين و أنه يكافئ ثايرستورين موصلين على التفرع وبشكل عكسي فإن خواصه تشبه خواص الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي كما هو مبين في الشكل (١ -٩).



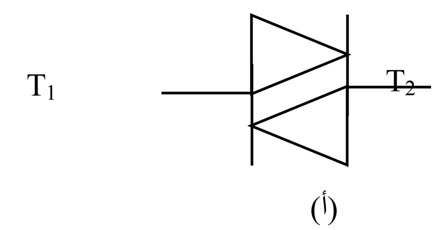
الشكل (١ -٩): خواص الترياك

الدياك Diac:

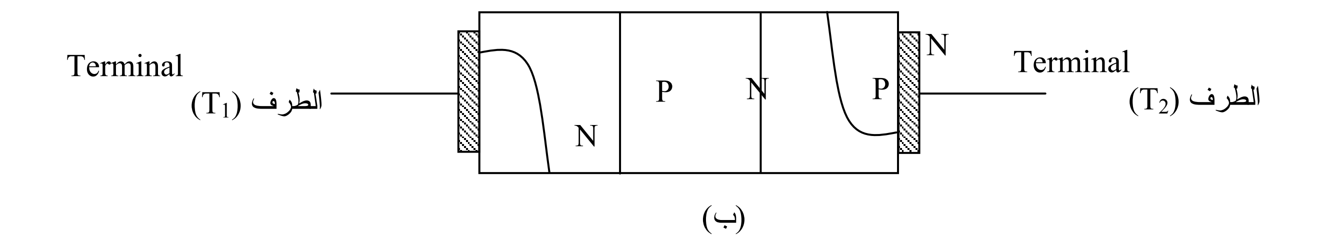
الدياك عبارة عن ترياك بدون طرف ثالث للبوابة و يوصل التيار الكهربائي في كلا الاتجاهين:

- من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 عندما يكون جهد الطرف T_1 أعلى من جهد الطرف T_2 بقيمة مساوية على الأقل قيمة جهد الانهيار
- من الطرف T_2 إلى الطرف T_1 عندما يكون جهد الطرف T_2 أعلى من جهد الطرف T_1 بقيمة مساوية على الأقل قيمة جهد الانهيار.

يبين الشكل (١ -١٠) الرمز و التركيب الطبقي الخاص بالدياك.



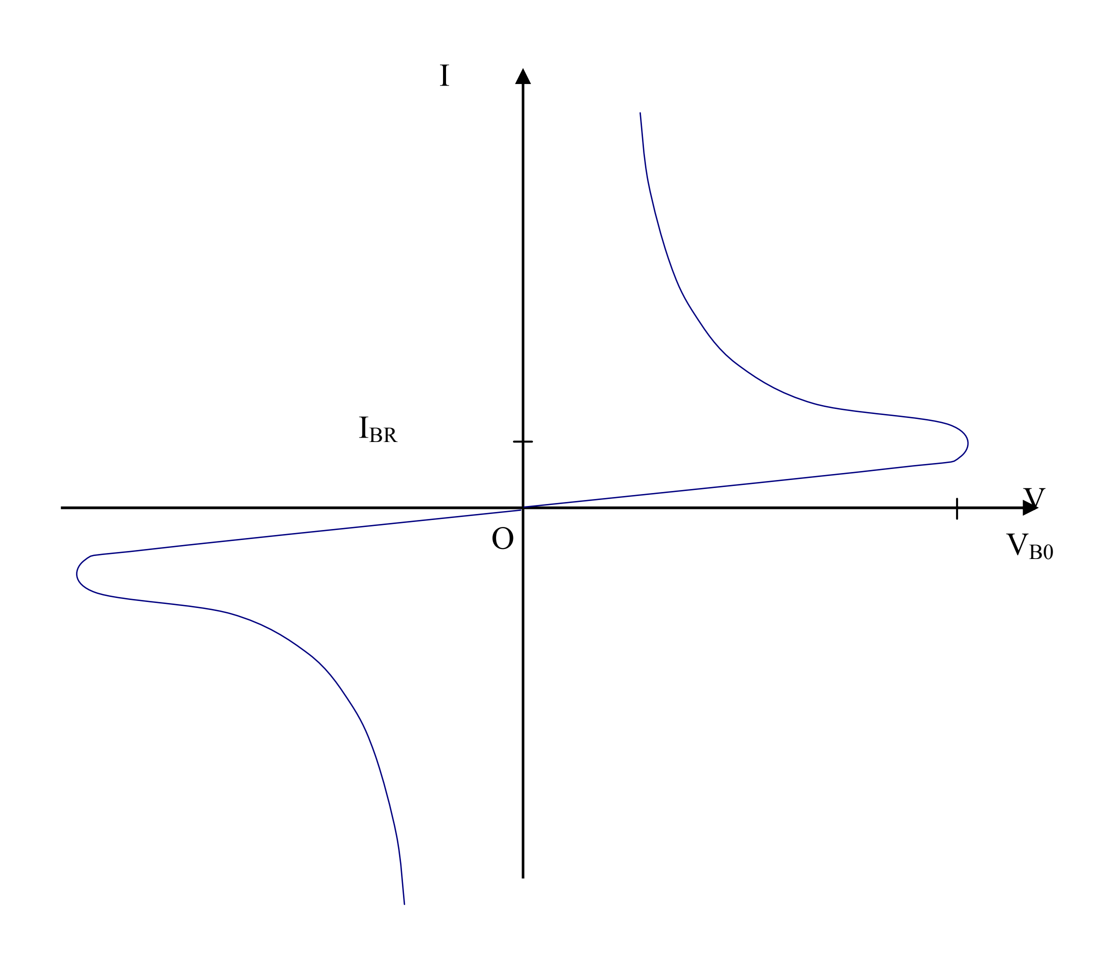
(أ)



(ب)

الشكل (١ -١٠): الدياك (أ) الرمز (ب) التركيب

أما خواص الدياك الموضحة في الشكل (١ -١١) فهي تشبه تمامًا خواص الترياك عند إلغاء تيار البوابة I_G إلا أن قيمة جهد الانهيار أصغر. يستعمل الدياك في دوائر الإشعال للثايرستور و الترياك حيث يستفاد من قيمة جهد انهياره في تحديد زاوية الإشعال.



الشكل (١ -١١): خواص الدياك

أسئلة :

١ -١ ما هو الثايرستور؟

١ -٢ ما هو الاسم البديل المستعمل للثايرستور؟

١ -٣ متى يكون الثايرستور في الانحياز الأمامي؟

١ -٤ متى يكون الثايرستور في الانحياز الخلفي؟

١ -٥ ما هي الشروط اللازم توفرها لإشعال الثايرستور؟

١ -٦ كيف يتم إيقاف الثايرستور عن التوصيل؟

١ -٧ اذكر مع الشرح الطرق المختلفة المستعملة لإشعال الثايرستور

١ -٨ كيف تتم حماية الثايرستور؟

١ -٩ متى يوصل الترياك التيار من الطرف T_1 إلى الطرف T_2؟

١ -١٠ ارسم الدائرة المكافئة للترياك

١ -١١ أذكر بعض تطبيقات عملية للترياك؟

١ -١٢ متى يوصل الدياك التيار من الطرف T_1 إلى الطرف T_2؟

١ -١٣ أذكر بعض تطبيقات عملية للدياك؟

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



إلكترونيات القوى

الموحدات المحكومة الأحادية الأوجه

الموحدات المحكومة الأحادية الأوجه

٢

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة لابد أن يكون الطالب ملما وقادرا على تفسير التالي:

- مبدأ عمل موحد نصف موجة محكوم أحادى الوجه والمتصل بحمل مادي أو حمل حثي مستعينا بالموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد
- مبدأ عمل موحد موجة كاملة محكوم كليًا والمتصل بالحمل المادي أو الحثي مستعينا بالموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد
- مبدأ عمل موحد موجة كاملة نصف محكوم

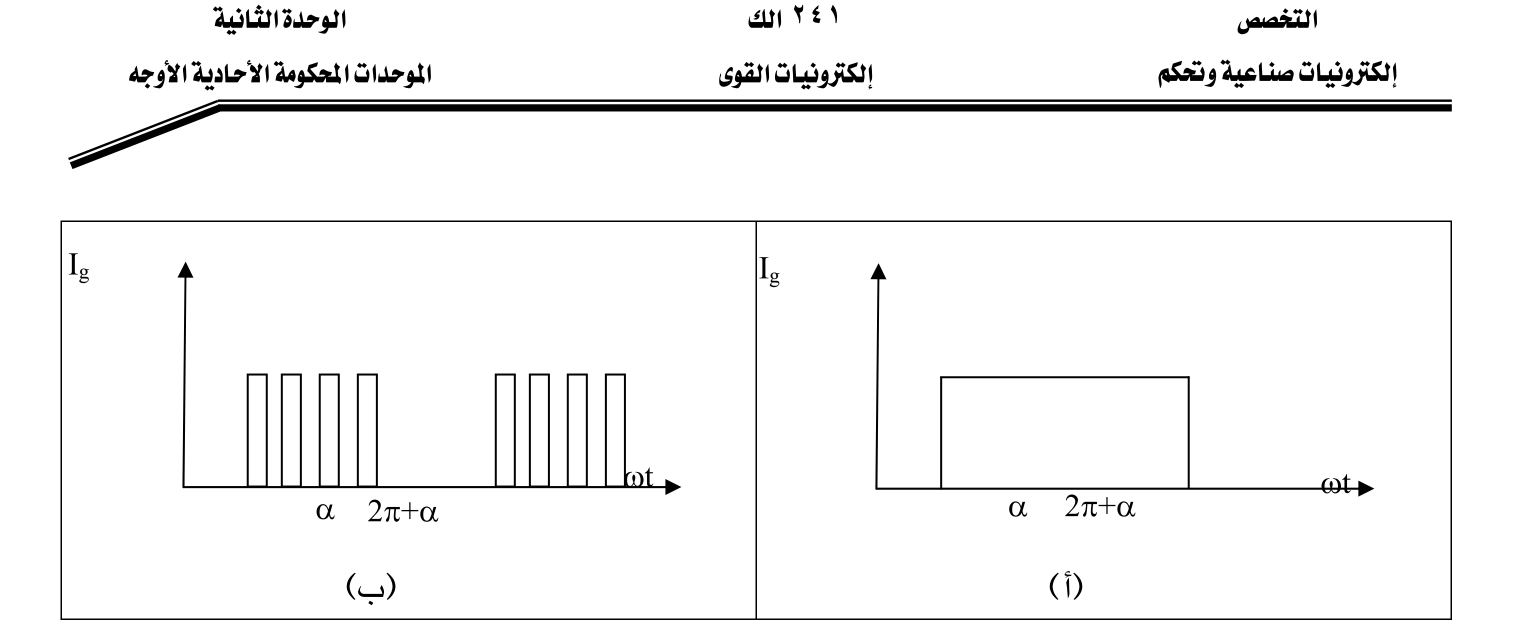
مقدمة :

سوف يتم دراسة بعض الدوائر الأساسية للموحدات المحكومة الأحادية الأوجه واللازمة لتحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر. وسوف يتم دراسة تفصيلية للموحدات نصف موجة وموجة كاملة محكومة أحادية الأوجه والمتصلة بحمل مادي (R) أو حمل حثي (R-L). وسوف يتم الدراسة على أساس أن جميع هذه الموحدات الأحادية الأوجه متصلة بمصدر جهد متناوب له موجة جيبية بقيمة V_m حيث إن V_m هي القيمة العظمى لهذا المصدر الجيبي.

الشروط اللازمة لتشغيل الثايرستور (الموحد السليكوني المحكوم):

كما سبق توضيحه في الباب السابق بأن الثايرستور(Thyristor) أو الموحد السليكوني المحكوم (SCR) لابد أن يتوافر له شرطان أساسيان حتى يتم إشعاله (قدحه) وهذان الشرطان يمكن تلخيصهما كالتالي:

١. لابد أن يكون جهد الأنود الخاص بالثايرستور اكبر من جهد الكاثود الخاص به وبالتالي يصبح فرق الجهد ما بين الأنود و الكاثود موجب حتى يبقى الثايرستور في وضع الانحياز الأمامي.
٢. لابد من وصول نبضة لبوابة الثايرستور بقيمة تيار بوابي كافٍ لإشعال الثايرستور وهذه النبضة ممكن أن تكون أحادية تتكرر كل دورة زمنية قيمتها 2π أو تكون هذه النبضة عبارة عن عدة نبضات مستمرة كافية لإشعال الثايرستور وتتكرر كل فترة زمنية قيمتها 2π و الشكل (٢ -١) يوضح شكل هذه النبضة وعادة لا يفضل وجود نبضة مستمرة كاملة عند طرف بوابة الثايرستور حتى لا يزيد الفقد الخاص بالثايرستور مما يؤدي إلى تقليل عمره الافتراضي.



الشكل (٢ -١): علاقة تيار بوابة الثايرستور مع الزمن في حالة وجود: (أ) نبضة واحدة مستمرة عند طرف البوابة (ب) نبضات مستمرة عند طرف البوابة.

موحدات نصف موجة محكومة أحادية الأوجه مع الحمل المادي

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with a resistive load

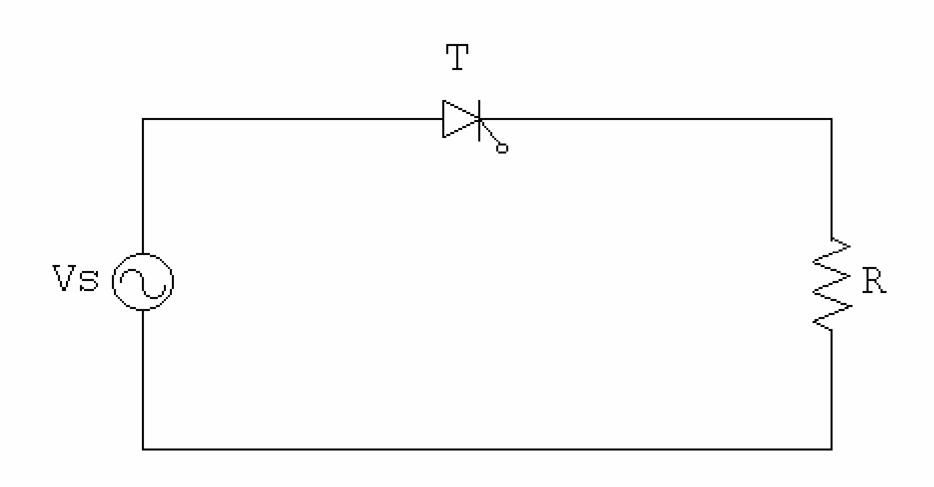
يبين الشكل (٢ -٢) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي R .وعندما يكون الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي أي خلال الفترة الموجبة (عبارة عن نصف دورة) لموجة مصدر الجهد فإن الثايرستور سيوصل أي أنه سيمرر التيار الكهربي وذلك في حالة إعطاء بوابة الثايرستور النبضة اللازمة لإشعال الثايرستور وذلك خلال أي لحظة في الفترة الموجبة لموجة مصدر الجهد ولتكن (t_o) كما في الشكل (٢ -٣) سيمر التيار خلال الحمل المادي (R) وذلك في حالة توصيل الثايرستور عند تلك اللحظة (t_o) وبالتالي سيكون شكل موجة جهد الخرج (V_o) على الحمل المادي هو نفسه شكل جهد المصدر الجيبي.

و ينعدم تيار الحمل 'R' عندما تكون ($t_o = \pi$) حيث عند هذه اللحظة سيتحول الثايرستور من الانحياز الأمامي إلى الانحياز الخلفي وذلك لان فرق الجهد بين طرفي الأنود و الكاثود للثايرستور سوف يصبح له قيمة سالبة و يصبح الثايرستور له مقاومة داخلية لانهائية تقريبا والتي تمنع مرور التيار الكهربي في الدائرة خلال نصف الدورة السالب لموجة الجهد الجيبي وبالتالي يصبح جهد خرج الحمل 'R' له قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية. ويبدأ مرور التيار في الدائرة مرة أخرى بإعطاء الثايرستور النبضة اللازمة لإشعاله وذلك عند اللحظة الزمنية $t_o = 2\pi$ ويبين الشكل (٢ -٣) شكل موجة المصدر الجيبي وموجة

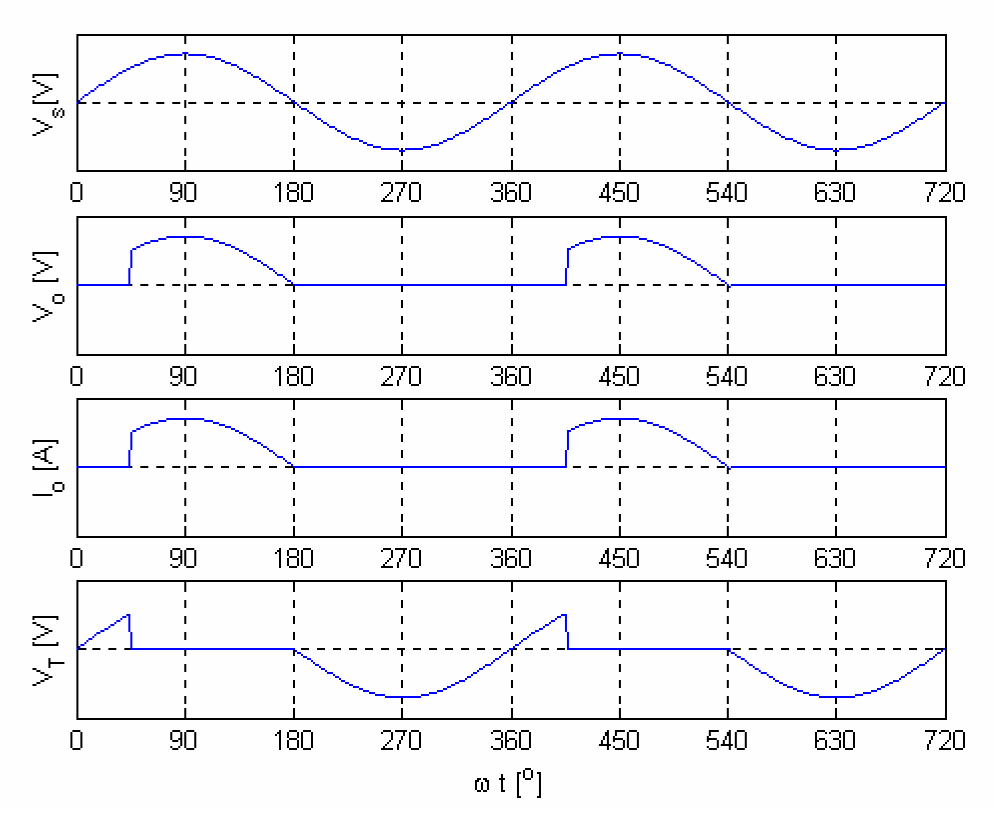
جهد الخرج (الحمل) 'v_o' وموجة تيار الخرج 'i_o' وموجة فرق الجهد بين طرفي الأنود و الكاثود للثايرستور 'v_T' والنبضة اللازمة لإشعال الثايرستور ويمكن تلخيص عمل الدائرة خلال دورة كاملة كما يلي:

$$V_0 = \begin{cases} 0 & , \ 0 < t < t_0 \\ V_m \sin \omega t & , t_0 < t < \pi / \omega \\ 0 & , \ \pi / w < t < 2\pi / \omega \end{cases}$$

حيث أن الفترة الزمنية من 0 حتى t_o تمثل الفترة الزمنية التي يمرر فيها الثايرستور التيار خلال نصف الدورة الموجبة للمصدر الجيبي علما بأن اللحظة الزمنية t_o أو الزاوية ωt_o تسمى بزاوية الإشعال α والفترة الزمنية من ωt_o حتى π تسمى بزاوية التوصيلγ.



الشكل (٢ -٢): دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي 'R'.



الشكل (٢ -٣): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٢).

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج Average load voltage and current:

المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٢) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha) \quad (٢ -١)$$

حيث أن V_m هي القيمة العظمى لمصدر الجهد الجيبي المتناوب، و α هي قيمة زاوية إشعال الثايرستور.

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{0(avg)}}{R} \quad (٢ -٢)$$

ويمكن كتابة المعادلة (٢ -٢) بصيغة رياضية أخرى وذلك بعد تعويض المعادلة (٢ -١) في المعادلة (٢ - ٢):

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R}.(1+\cos\alpha) \quad (٢ -٣)$$

ويمكن أيضا كتابة معادلة القيمة المتوسطة لتيار الخرج بدلالة القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m' كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{I_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha) \quad (٢ -٤)$$

حيث أن I_m هي القيمة العظمى لتيار الخرج وقيمته V_m/R.

القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج R.M.S. value of the load voltage and current

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢-٥)$$

وأيضا يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢-٦)$$

ويتم التحكم في قيم جهد الخرج كما تعلمنا المعادلات السابقة عن طريق التحكم في قيمة زاوية الإشعال(α) للثايرستور وتؤدي زيادة قيمة الزاوية (α) إلى تقليل جهد الخرج وبالعكس يؤدي تقليل قيمة الزاوية (α) إلى زيادة قيمة جهد الخرج.

ويمكن الحصول على أكبر قيمة متوسطة لجهد الخرج (V_{do}) وذلك عند قيمة زاوية إشعال صفرية أي أن (α =٠) وبالتعويض في المعادلة (٢ -١) نحصل على قيمة V_{do} كالآتي:

$$V_{do} = \frac{V_m}{\pi} \qquad (٢-٧)$$

نلاحظ بالنسبة للدائرة السابقة بأن موجة جهد الخرج Vo عبارة دالة غير متصلة ولها توافقيات عالية وتحتوي على مركبات جهد متناوب ولا تمثل هذه الموجة الحالة المثالية المطلوبة للحصول على الجهد المستمر الثابت القيمة.

معامل القدرة الكهربية (Power Factor)

يعرف معامل القدرة الكهربي 'PF' للمصدر الكهربي على أساس أنه عبارة عن قيمة القدرة الفعالة 'P' عند المصدر مقسوم على القدرة الظاهرية 'S' عند المصدر وتمثل معادلته كالتالي:

$$PF = \frac{P}{S} \qquad (٢-٨)$$

ويمكن كتابة قيم القدرة الفعالة والظاهرية عند المصدر في حالة الثايرستور المثالي والذي له طاقة صفرية مفقودة كالآتي

$$P = I_{rms}^2 R \qquad (٢-٩)$$

$$S = I_{rms} V_s \qquad (٢-١٠)$$

ويمكن استنتاج المعادلة العامة لمعامل القدرة الكهربي وذلك بعد تعويض المعادلتين (٢ -٩) و (٢ -١٠) في المعادلة (٢ -٨) كالآتي:

$$PF = \frac{I_{rms} R}{V_s} \quad (٢ -١١)$$

ويمكن أيضا استنتاج معادلة معامل القدرة الكهربي لدائرة موحد نصف موجة محكوم والمتصل بحمل مادي 'R' وذلك بعد تعويض المعادلة (٢ -٦) في المعادلة (٢ -١١) كالآتي:

$$PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \quad (٢ -١٢)$$

مثال ٢ -١:

يتغذى موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه من مصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 120 V. إذا علمت بأن قيمة مقاومة الحمل المادي 10 Ω, فأوجد القيمة المتوسطة لجهد الحمل 'V_o' وقيمة قدرة الحمل 'P_L' عند زوايا الإشعال التالية:

(أ) $\alpha = 0^o$ (ب) $\alpha = 45^o$ (ج) $\alpha = 90^o$

(د) $\alpha = 135^o$ (هـ) $\alpha = 180^o$

الحل:

يتم أولاً تعيين القيمة العظمى لمصدر الجهد المتناوب 'V_m' كالتالي:

$$V_m = V_s\sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 169.7 \text{ V}$$

يمكن تعيين قيمة جهد الحمل المتوسط '$V_{o(avg)}$' وقدرة الحمل 'P_L' باستخدام المعادلات (٢ -١) و (٢ -٩) وهما كالتالي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1 + \cos\alpha)$$

$$P_L = I_{rms}^2 R$$

(أ) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 0^o$ سوف نحصل علي القيم التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi}.(1 + \cos 0^o) = 54 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{V_m}{2R}.\sqrt{(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} = \frac{169.7}{20}\sqrt{1-0} = 8.485 \text{ A}$$

$$P_L = I_{o(rms)}^2 R = 8.485^2.10 = 720 \text{ W}$$

(ب) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 45^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi}.(1+\cos 45^o) = 46.1 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20}.\sqrt{1-\frac{45.\pi}{180}.\frac{1}{\pi}+\frac{\sin 90^0}{2\pi}} = 8.09 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 8.09^2.10 = 654.55 \text{ W}$$

(ج) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 90^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi}.(1+\cos 90^o) = 27 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20}.\sqrt{1-\frac{90.\pi}{180}.\frac{1}{\pi}+\frac{\sin 180^0}{2\pi}} = 6 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 6^2.10 = 360 \text{ W}$$

(د) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 135^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi}.(1+\cos 135^o) = 7.91 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20}.\sqrt{1-\frac{135.\pi}{180}.\frac{1}{\pi}+\frac{\sin 270^0}{2\pi}} = 2.56 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 2.56^2.10 = 65.4 \text{ W}$$

(هـ) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 180^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi}.(1+\cos 180^o) = 0 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20}.\sqrt{1-\frac{180.\pi}{180}.\frac{1}{\pi}+\frac{\sin 360^0}{2\pi}} = 0 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 0 \text{ W}$$

نستنتج من حل هذا المثال أن القيم المتوسطة لجهد و تيار الحمل من جهة وقدرة الحمل من جهة أخرى يتناقصان مع زيادة زاوية إشعال الثايرستور 'α' ويمكن تلخيص نتائج المثال كما هو مبين بالجدول التالي:

α	0	45^o	90^o	135^o	180^o
$V_{o(avg)}$ V	54	46.1	27	7.91	0
P_L W	720	654.6	360	65.4	0

مثال ٢ -٢:

يتغذى موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه من مصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 120 V. إذا علمت بأن هذا الموحد متصل بحمل مادي قيمته 10 Ω و إذا كانت زاوية إشعال الثايرستور 'α' قيمتها 60^o، فعين:

- قدرة الحمل المادي المسحوبة من المصدر الكهربي 'P_L'.
- معامل القدرة الكهربية للمصدر الكهربي 'PF'.

الحل:

- تعين القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m' كالتالي:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{120\sqrt{2}}{10} = 16.97 \text{ A}$$

- تعين قيمة قدرة الحمل المادي كالآتي:

$$P_L = I_{rms}^2 R$$

$$\because I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})}$$

$$\therefore P_L = \frac{I_m^{\ 2}}{4}.R.(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}) = \frac{16.97^2}{4}.10.(1-\frac{60}{\pi}.\frac{\pi}{180}+\frac{\sin 120}{2\pi} = 579 \text{ W}$$

- يعين معامل الكهربية 'PF ' باستخدام المعادلة (٢ -١٢) كالآتي:

$$\because PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})}$$

$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1-\frac{60}{\pi}.\frac{\pi}{180}+\frac{\sin 120}{2\pi})} = .634 \text{ Lag.}$$

مثال ٢ -٣:

يتصل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 150 V وتردده 60 Hz وحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 'α' 30^o, فأوجد:

- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.
- القيمة المتوسطة لجهد الحمل '$V_{o(avg)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل '$I_{o(avg)}$'.
- القيمة الفعالة لتيار الحمل '$I_{o(rms)}$'.
- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.
- زاوية التوصيل 'γ'.

- تردد موجة الخرج $'f_o'$.
- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر $'V_m'$

$$V_m = V_s\sqrt{2} = 150\sqrt{2} = 212 \text{ V}$$

- القيمة العظمى لتيار الحمل $'I_m'$

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{212}{10} = 21.2 \text{ A}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج $'V_{o(avg)}'$

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha) = \frac{212}{2\pi}.(1+\cos 30^0) = 63 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل $'I_{o(avg)}'$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{63}{10} = 6.3 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل $'I_{o(rms)}'$

$$\because I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} = \frac{21.2}{2}.\sqrt{1-\frac{30}{\pi}.\frac{\pi}{180}+\frac{\sin 60^o}{2\pi}} = 10.45 \text{ A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر $'P_L'$

$$P_L = I^2_{rms}R = 10.45^2.10 = 1092 \text{ W}$$

- زاوية التوصيل $'\gamma'$ في حالة وجود حمل مادي 'R'

$$\gamma = 180^o - \alpha = 180^o - 30^o = 150^o$$

حيث أن موجة الخرج (الحمل) تتكرر مرة واحدة كل دورة زمنية لدائرة هذا الموحد كما هو مبين بالشكل (٢ -٣). ففي هذه الحالة يكون تردد موجة الخرج $'f_o'$ هو نفسه تردد المصدر الكهربي:

$$f_o = f_s = 60 \text{ Hz}$$

- معامل القدرة الكهربية 'PF'

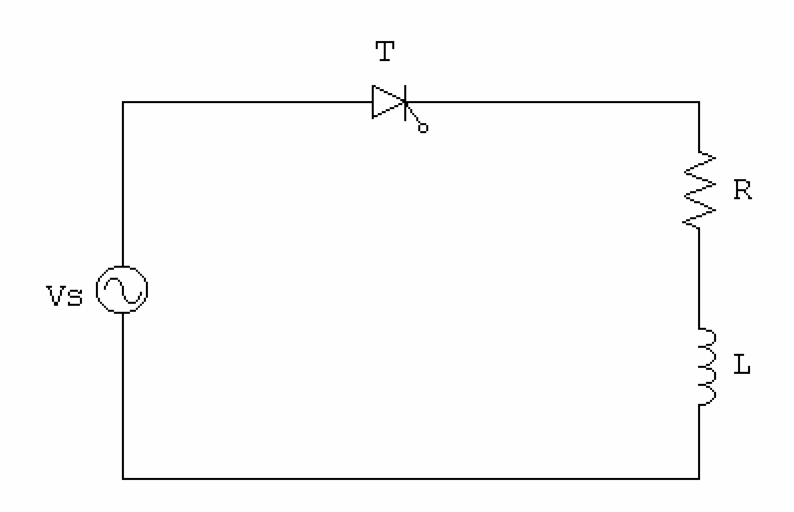
$$\because PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})}$$

$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1-\frac{30}{\pi}.\frac{\pi}{180}+\frac{\sin 60}{2\pi})} = 0.7 \text{ Lag.}$$

موحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with an Inductive Load 'R-L'

يبين الشكل (٢ -٤) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي'R-L' ويبين الشكل (٢ -٥) كل من موجة جهد المصدر المتناوب'v_s' وموجة جهد الخرج 'v_o' وموجة تيار الخرج 'i_o' وموجة الجهد الناشئ على أطراف الثايرستور 'v_T'.

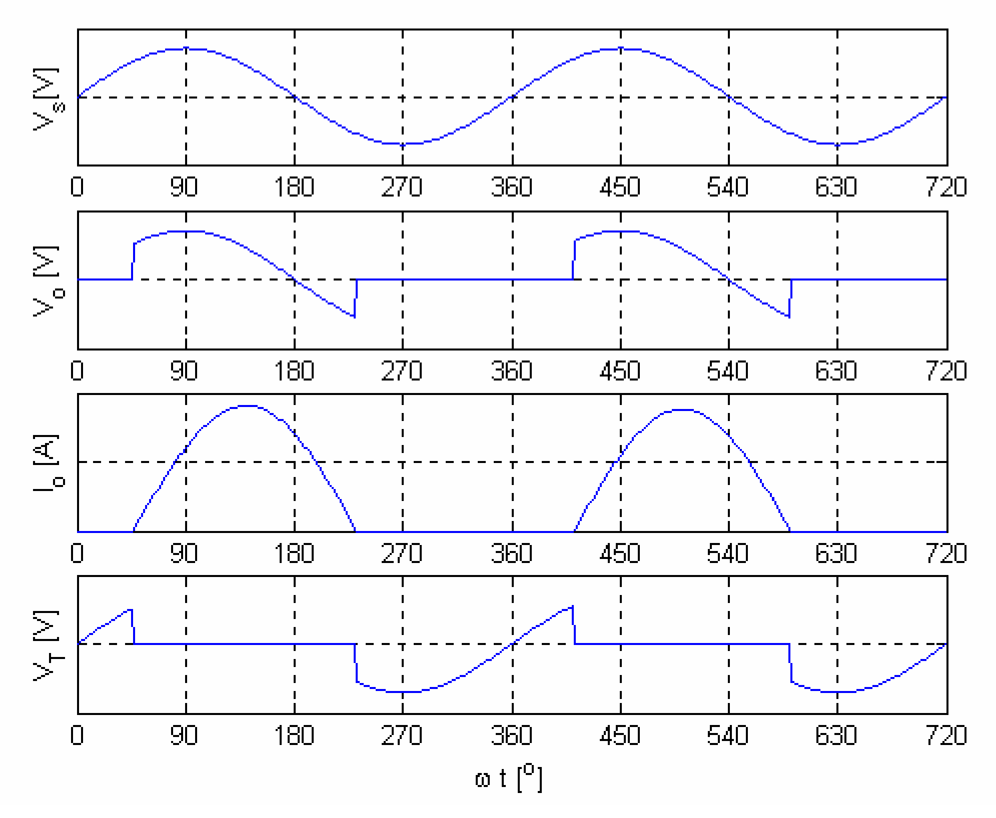


الشكل (٢ -٤): دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل حثي 'R-L'.

فكرة عمل الدائرة:

ويمكن أن نبين فكرة عمل الدائرة بالاستعانة بالشكل (٢ -٥) كالتالي:
عندما يتم توصيل الثايرستور بمصدر الجهد المتناوب 'vs' وإعطاء نبضة كهربية كافية لإشعاله (قدحه) بزاوية إشعال'α' فإن الثايرستور سوف يتحول من وضع الانحياز الخلفي إلى وضع الانحياز الأمامي أي سوف يتحول من وضع الفتح إلى وضع الإغلاق وبالتالي فسوف يمرر الثايرستور التيار عند اللحظة $\omega t = \alpha$ بشرط أن تكون قيمة هذه الزاوية 'α' أكبر من أو تساوي زاوية الحمل $\left(\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right)$ فعند هذه اللحظة يبدأ مرور التيار في الدائرة حيث يبدأ بقيمة صفرية ثم تزداد قيمته تدريجيا ثم يقل حتى يصل لقيمة صفرية مرة أخرى وذلك عند الزاوية 'β' والتي تسمى بزاوية إطفاء الثايرستور (Extinction angle). وعادة ما تكون قيمة زاوية إطفاء الثايرستور في حالة هذه الدائرة أكبر من 180^o ويفسر سبب ذلك إلى إنه عند مرور التيار في الملف الحثي فسوف ينشأ مجال مغناطيسي بداخله وعن طريق هذا المجال يتم تخزين طاقة مغناطيسية بداخله وهذه الطاقة المغناطيسية المختزنة بالملف تجبر الثايرستور على بالاستمرار

في التوصيل وتعطيه فرصة أكبر لزيادة الفترة الزمنية التي يمرر فيها التيار ويتم انقطاع التيار عن الثايرستور عند الزاوية 'β' والتي تزيد قيمتها عن 180^o حيث يتم استرجاع هذه الطاقة إلى المصدر الكهربي خلال الفترة الزمنية $\pi < \omega t < \beta$. ونتيجة لهذا فإن فرق الجهد بين أطراف الثايرستور 'v_T' يكون موجب خلال الفترة الزمنية $\alpha < \omega t < \beta$ بينما قيمة جهد خرج الحمل يحتوي على قيم موجبة وقيم سالبة كما هو مبين بالشكل (٢ -٥) وبالتالي تكون قيمته المتوسطة أقل من القيمة التي يمكن الحصول عليها في حالة وجود حمل مادي فقط 'R' حيث إن جهد الخرج له دائما قيمة موجبة ولا يحتوي على أي قيمة سالبة.



الشكل (٢ -٥): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٤)

القيمة المتوسطة لجهد وتيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٤) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢ -١٣)$$

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢ \ -١٤)$$

حيث يمكن تعيين قيمة زاوية الإطفاء 'β ' بحل المعادلة الآتية جبريا:

$$\sin(\beta - \alpha) = \sin(\alpha - \phi).e^{(\frac{\alpha-\beta}{\tan\phi}}$$

حيث أن:

α هي زاوية إشعال الثايرستور

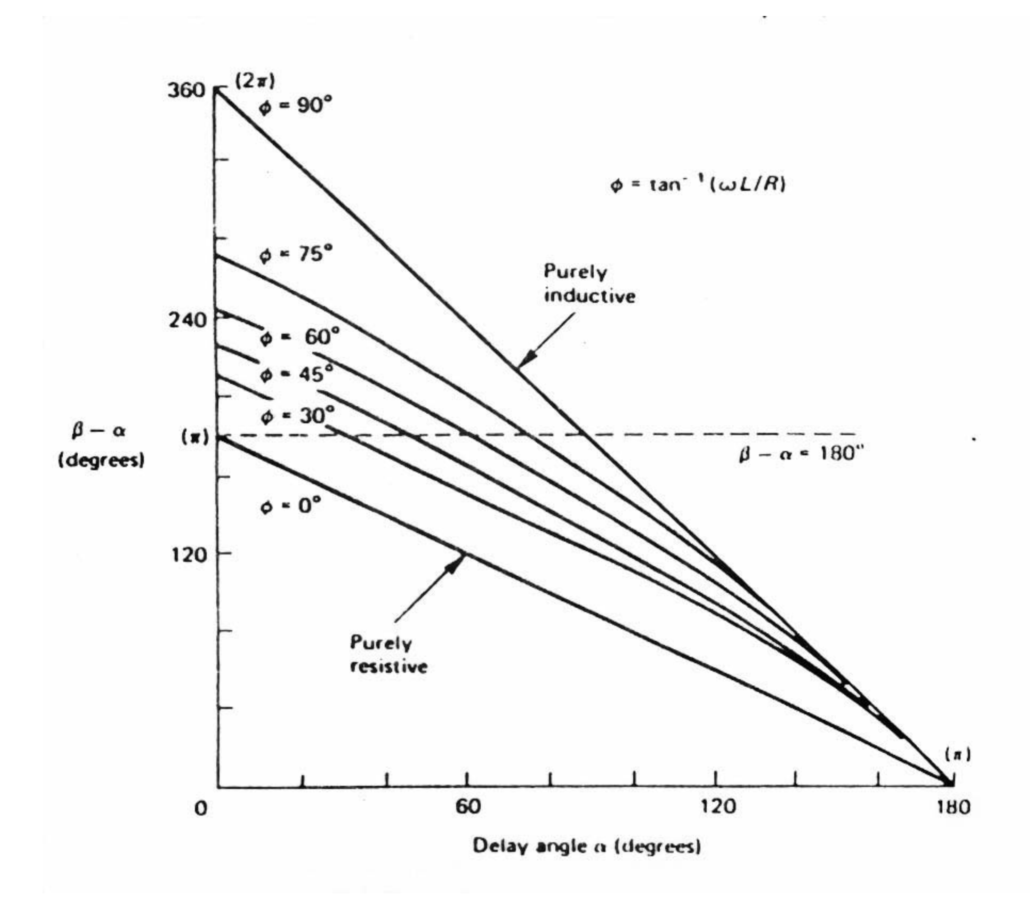
Φ هي زاوية الحمل ويمكن حسابها بمعرفة قيم الحمل الحثي $\left(\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right)$.

ويمكن أيضا تعيين قيمة زاوية الإطفاء 'β ' مستخدما الشكل (٢ -٦) عند أي قيمة لزاوية إشعال الثايرستور 'α' وزاوية الحمل 'Φ'. ولتعيين قيمة β تحدد أولا قيمة Φ عن طريق معرفة قيم الملف ثم بمعرفة قيمة α يمكن تعيين قيمة زاوية التوصيل 'γ' ثم يتم تعيين قيمة β $(\beta = \gamma + \alpha)$. نلاحظ من الشكل (٢ - ٦) بأن المنحنى المرسوم عند زاوية $\Phi = 0^o$ يمثل حالة الحمل المادي 'R' بينما عند زاوية $\Phi = 90^o$ يمثل حالة الحمل الحثي البحت (L).

تعريفات:

يمكن تلخيص بعض التعريفات المهمة كالتالي:

- **زاوية إشعال الثايرستور 'α'**: هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يبدأ عندها الثايرستور التوصيل وامرار التيار الكهربي وذلك في حالة وصول نبضة عند بوابة الثايرستور بتيار كافي.
- **زاوية إطفاء الثايرستور 'β'**: هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يتحول عندها الثايرستور من وضع التوصيل إلى وضع الفصل أي هي اللحظة التي سوف يصل عندها التيار المار في الثايرستور إلى القيمة الصفرية.
- **زاوية توصيل الثايرستور 'γ'**: هي الفترة الزمنية التي يوصل فيها الثايرستور ويمرر التيار خلال فترة زمنية دورية واحدة.



الشكل (٢ -٦) علاقة زاوية إشعال الثايرستور'α' مع زاوية إطفاءه 'β'عند قيم مختلفة لزاوية الحمل 'Φ'

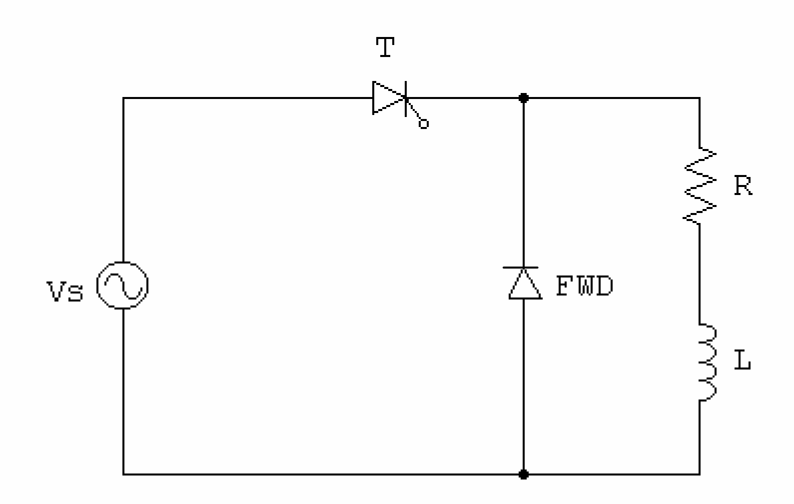
موحدات نصف موجة محكومة أحادي الوجه مع الحمل الحثي و دايود حذافه

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with an Inductive Load and a Free-Wheeling Diode

كما تبين من الدراسة السابقة لموحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه والمتصلة بحمل حثي بأن موجة جهد الخرج تحتوي على قيم موجبة وقيم سالبة وهذا يؤدي إلى تقليل القيمة المتوسطة لجهد الخرج وإضافة لذلك أن موجة تيار الخرج تكون عبارة عن دالة غير متصلة ولها معامل تشويه عال ويمكن تحسين العيوب السابقة بإضافة دايود حذافة (Free-wheeling diode).

يبين الشكل (٢ -٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي 'R-L' و دايود حذافة ونلاحظ بأن توصيل أطراف هذا الدايود بحيث أن لا يوصل هذا الدايود خلال الفترة الزمنية التي يمرر فيها الثايرستور التيار الكهربي وإذا تم تبديل أطراف هذا الدايود فسوف تنشأ

دائرة قصر (Short-circuit) مع المصدر الكهربي ذو الموجة الجيبية ولهذا لابد من توصيل أطراف الدايود الحذافة كما هو مبين بالشكل (٢ -٧).

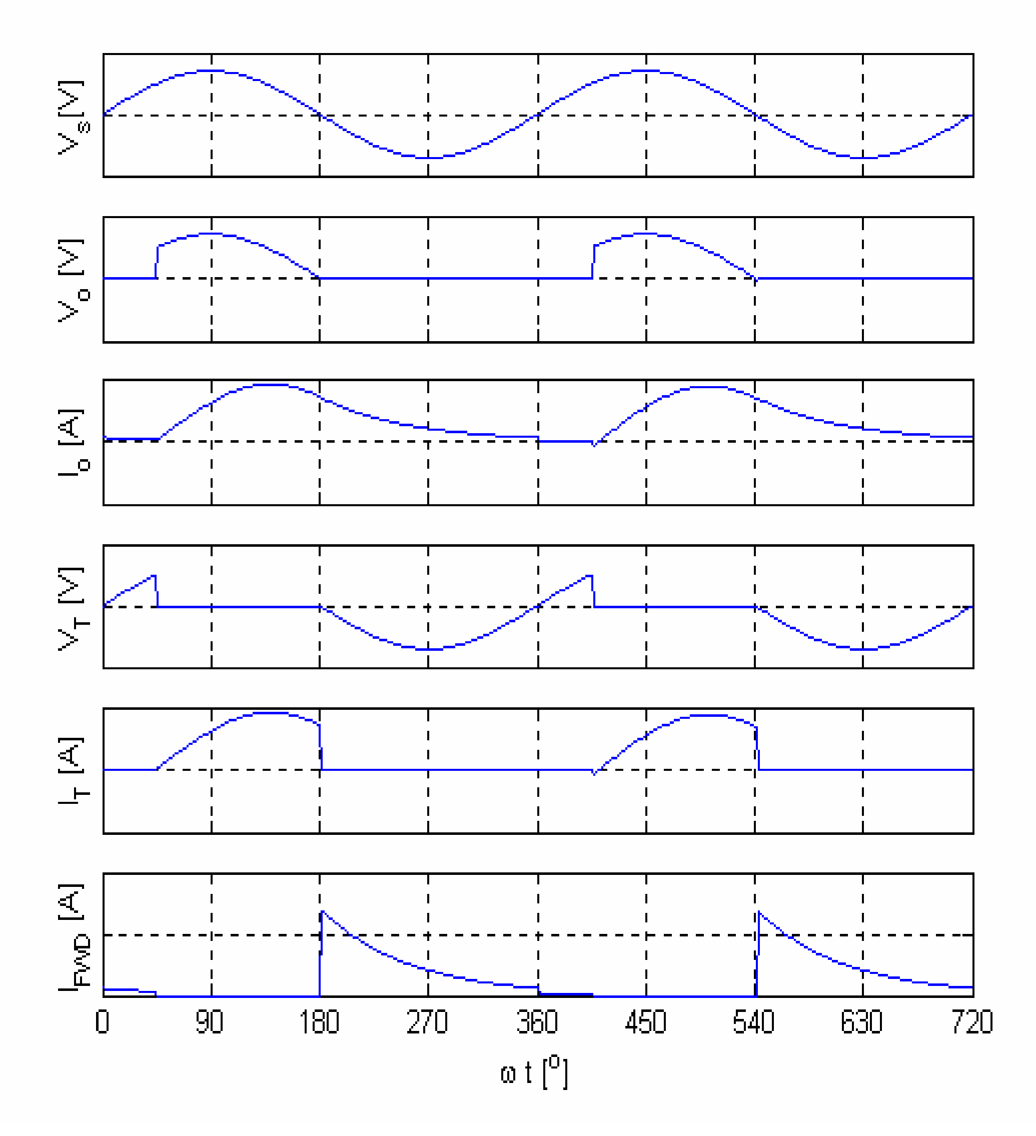


الشكل (٢ -٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل حثي 'R-L' مع دايود حدافه.

فكرة عمل الدائرة:

ويمكن شرح فكرة عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢ -٧) بالاستعانة بموجات هذه الدائرة والمبينة بالشكل (٢ -٨) كالتالي. فكما سبق شرحه فإن الثايرستور لن يوصل ولن يمرر التيار إلا عندما يكون جهد الأنود الخاص به أكبر من جهد الكاثود الخاص به وأيضا لابد من وصول نبضه لبوابة الثايرستور بتيار كافي وكافية لقدحه بزاوية إشعال 'α' فإذا تحقق هذان الشرطان فسوف يوصل الثايرستور وسوف يمرر التيار كما هو مبين بالشكل (٢ -٨). لن يمرر الثايرستور التيار خلال الفترة الزمنية $0 < \omega t < \alpha$ حيث لا توجد نبضة كهربية خلال هذه الفترة الزمنية وعند وصول هذه النبضة بزاوية إشعال 'α' يبدأ الثايرستور التوصيل وتمرير عند اللحظة $\omega t = \alpha$ ويبدأ التيار بقيمة صفرية عند هذه اللحظة الزمنية ويزداد تدريجيا ثم يقل تدريجيا حتى يصل لقيمة صفرية مرة أخرى عند اللحظة الزمنية المساوية لزاوية إطفاء الثايرستور 'β'. يمكن تقسيم الفترة الزمنية $\alpha < \omega t < \beta$ إلى فترتين زمنيتين وهما $\alpha < \omega t < \pi$, $\pi < \omega t < \beta$ فخلال الفترة الزمنية الأولى $\alpha < \omega t < \pi$ فإن الثايرستور سوف يمرر التيار خلال هذه الفترة خلال الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي الجيبي المتناوب 'v_s' والحمل الحثي 'R-L' وبالتالي تصبح قيمة جهد الخرج 'v_o' هي تقريبًا قيمة جهد الدخل'v_s' أي أن $v_o = v_s$ ونتيجة لمرور تيار كهربي في الحمل الحثي خلال هذه الفترة الزمنية فإن الملف سوف يخزن طاقة مغناطيسية خلال هذه الفترة الزمنية. نلاحظ من الشكل (٢ -٨) أن جهد الخرج يصل لقيمة صفرية عند اللحظة $\omega t = \pi$ بالرغم

من وجود قيمة لتيار الحمل الحثي فعند هذه اللحظة الزمنية وخلاف الحالة السابقة (بدون الدايود الحدافه) لا يمكن أن يصل لقيمة سالبة خلال الفترة الزمنية الثانية $\pi < \omega t < \beta$ حيث خلال هذه الفترة الزمنية يعمل الدايود الحذافة ويمرر تيار الحمل الحثي من خلاله ويصبح الثايرستور في حالة الانحياز الخلفي خلال هذه الفترة الزمنية أي خلال هذه الفترة الزمنية فإن التيار يمر من خلال الدائرة المغلقة المكونة من الحمل الحثي و الدايود الحذافة فقط ونلاحظ بأن التيار يمر خلال هذه الفترة الزمنية نتيجة الطاقة المغناطيسية المختزنة بالملف الحثي.



الشكل (٢ -٨): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٧)

وظيفة الدايود الحدافه:

مما سبق دراسته خلال الفقرة السابقة يمكن إيجاز وتوضيح وظيفة الدايود الحذافة كالتالي:

يمنع وجود أي جزء سالب بموجة جهد الخرج 'v_o' وبالتالي يؤدي ذلك لزيادة القيمة المتوسطة لجهد الخرج. يمكن التيار من التمرير خلال الحمل الحثي لفترة زمنية أطول وبالتالي يمكن أن يجعل تيار الحمل مستمر أي دالة متصلة وذلك تكون قيمة الممانعة لهذا الحمل الحثي كبيرة جدا بالنسبة لمقاومته المادية.

ونلاحظ بأن القيم المتوسطة لجهد و تيار الخرج يمكن التعبير عنهما باستخدام المعادلتين (٢ -١)، (٢ -٣) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R}.(1+\cos\alpha)$$

مثال ٢ -٤:

يتصل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه بمصدر جهد جيبي متناوب جهده الفعال 150 V وتردده 60 Hz و حمل حثي مع دايود حدافه. المقاومة المادية 'R' للحمل الحثي قيمتها 10 Ω و الممانعة الحثية 'ωL' له قيمتها 10 Ω. إذا علمت بأن زاوية إشعال الثايرستور قيمتها 30^o، فأوجد القيمة المتوسطة لجهد و تيار الحمل.

الحل:

حيث أن القيم المتوسطة لجهد وتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن التعبير عنهما بالمعادلات التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R}.(1+\cos\alpha)$$

إذن يمكن تعيين القيم السابقة كالآتي

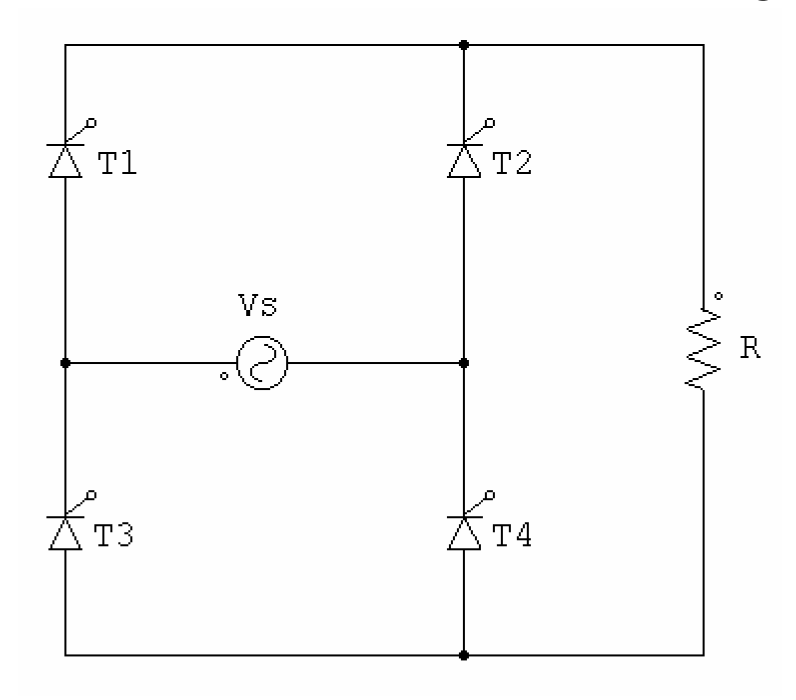
$$V_{o(avg)} = \frac{150\sqrt{2}}{2\pi}.(1+\cos 30^o) = 63 \text{ V}$$

$$I_{o(avg)} = \frac{63}{10} = 6.3 \text{ A}$$

موحدات موجة كاملة محكومة كليًا أحادية الوجه Single Phase Full-Wave Controlled Rectifier

الحمل المادي Resistive Load

يبين الشكل (٢ -٩) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه، و يتصل هذا الموحد بمصدر جهد كهربي جيبي جهده الفعال 'Vs' وحمل مادي 'R'. ويتكون هذا الموحد من عدد ٤ ثايرستورات كما هو موضح في الشكل (٢ -٩).



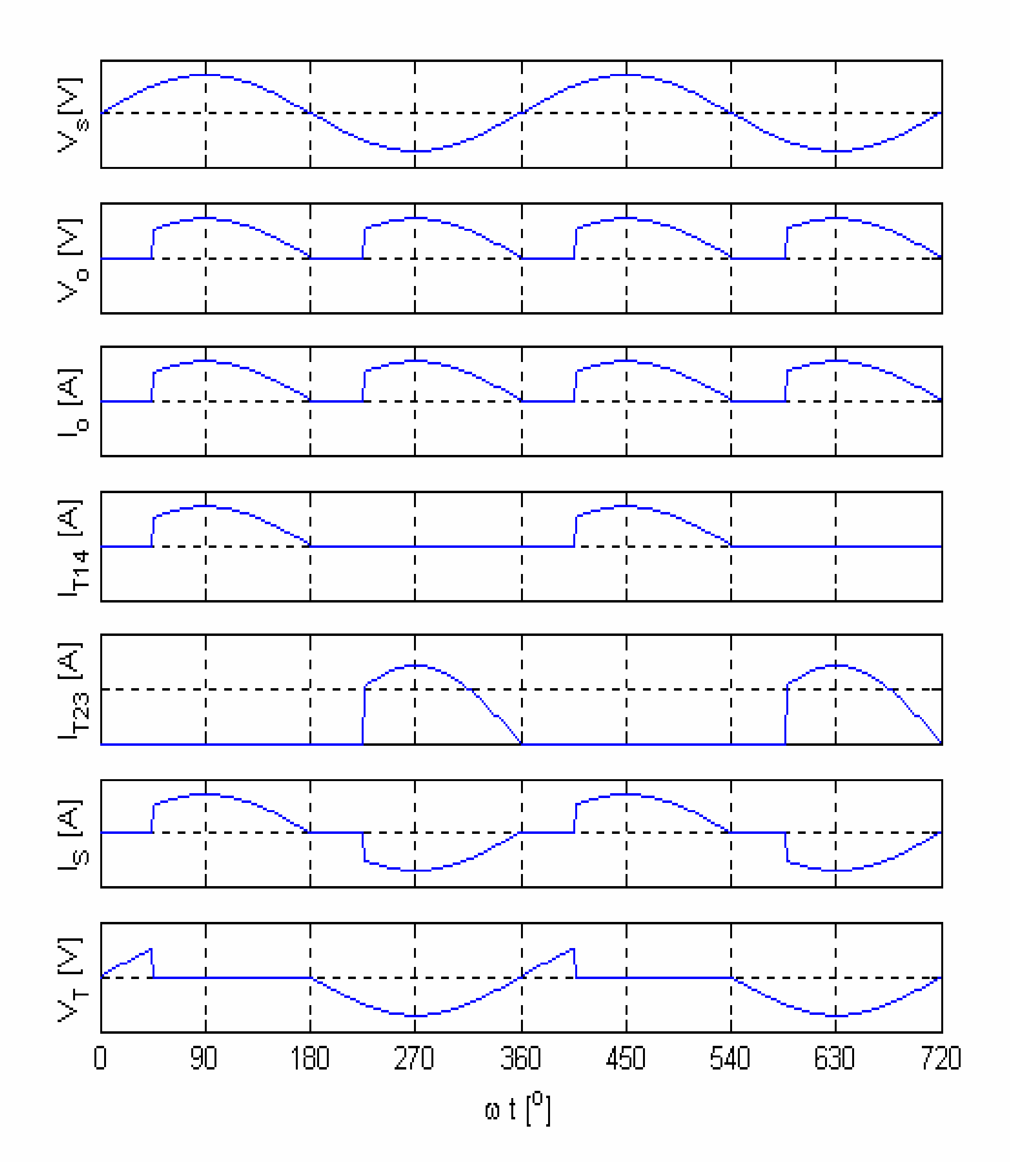
الشكل (٢ -٩): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل مادي 'R'.

احتياطات واجب مراعاتها لعمل الدائرة:

تبني فكرة عمل هذه الدائرة على أساس عدم توصيل أي زوج من الثايرستورات العلوية 'T_1, T_2' أو زوج الثايرستورات السفلية 'T_3,T_4' معًا في أي لحظة واحدة فسوف يؤدي ذلك إلى وجود دائرة قصر عند أطراف المصدر الكهربي ذي الجهد الجيبي المتناوب ولهذا السبب فلا بد من توصيل عدد واحد فقط من الثايرستورات العلوية ليعمل مع ثايرستور آخر من الثايرستورات السفلية. ويمكن إعطاء نبضة للثايرستور T_1 ونبضة للثايرستور T_4 في حالتنا هذه خلال الفترة $0 \leq \omega t \leq \pi$ و إعطاء نبضة للثايرستور T_2 ونبضة للثايرستور T_3 في حالتنا هذه خلال الفترة $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ ولابد من عزل كهربي لبوابات كل ثايرستور عن طريق استخدام محولات النبضة 'Pulse Transformer' والعوازل الضوئية 'Opto-Coupler'.

فكرة عمل الدائرة:

يمكن شرح فكرة عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢ -٩) بالاستعانة بموجات هذه الدائرة والمبينة بالشكل (٢ -١٠). يتم إعطاء نبضة لكلا من الثايرستور T_1 و الثايرستور T_4 بزاوية إشعال 'α' وذلك خلال الفترة الزمنية لنصف الدورة الموجبة '$\pi \leq \omega t \leq 0$' وعند وصول هذه النبضات إلى بوابتي الثايرستوران T_1,T_4 بتيار كافي لإشعالهما فسوف يكون كل من هذين الثايرستورين في حالة انحياز أمامي حيث يكون جهد كل أنود خاص بأي ثايرستور أعلى من جهد الكاثود الخاص به وبالتالي سوف يوصل كلا من هذين الثايرستورين ويمر التيار عبر الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي v_s والثايرستور T_1 والحمل المادي 'R' و الثايرستور T_4 ويصبح جهد الخرج 'V_o' والناشئ على أطراف الحمل المادي 'R' له قيمة مساوية لجهد الدخل (المصدر الكهربي) خلال هذه الفترة الزمنية. وخلال الجزء الآخر لدورة الجهد أي خلال نصف السالب لدورة الجهد يتم إشعال الثايرستورين T_2,T_3 أي إعطاء نبضات لأطراف البوابات الخاصة بهما عند زاوية إشعال قيمتها $\alpha + \pi$ فيتم مرور التيار عبر الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي الجيبي و الثايرستور T_2 و الحمل المادي 'R' و الثايرستور T_3 و نلاحظ بأن الفرق بين زوايا إشعال الثايرستوران T_4,T_1 الثايرستوران T_2,T_3 يكون قيمته 180^o و أيضا يكون اتجاه سريان التيار الكهربي دائما في الحمل في اتجاه واحد ويكون من أعلى إلى أسفل أي له قطبية واحدة وأن قيمة تيار الثايرستور T_1 هو نفسه قيمة تيار الثايرستور T_4 بينما قيمة تيار الثايرستور T_2 هو نفسه قيمة تيار الثايرستور T_3 ويكون شكل موجة الجهد على أطراف أي ثايرستور 'v_{AK}' يكون جزء من موجة المصدر الكهربي الجيبي ويكون أيضا شكل موجة تيار المصدر الكهربي 'i_s' جزء من موجة جيبية تحتوي علي أجزاء سالبة أجزاء موجبة أي عبارة عن موجة متناوبة بينما شكل موجة تيار الخرج 'i_o' يكون لها قطبية موجبة واحدة أي موجة مستمرة حيث يسير التيار في الحمل في اتجاه واحد. وحيث أن كلا من موجتي جهد وتيار الحمل تتكرر كل فترة زمنية قيمتها π فيصبح بالتالي تردد هذه الموجات له قيمة تساوي ضعف تردد المصدر الجيبي المتناوب.



الشكل (٢ -١٠): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل مادي 'R' .

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

تكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل الدائرة المبينة بالشكل (٢ -٩) ضعف القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل دائرة موحد نصف موجة محكوم والممثل بالدائرة المبينة بالشكل (٢ -٢) وبالتالي تؤخذ القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل في حالتنا هذه الصورة التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -١٥)$$

وتصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الخرج للحمل في الصورة التالية:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{\pi R}.(1+\cos\alpha) \quad (٢ - ١٦)$$

ويمكن كتابة المعادلة (٢ -١٦) بصورة أخرى كالتالي:

$$I_{o(avg)} = \frac{I_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) \quad (٢ - ١٧)$$

حيث أن:

V_m هي القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربي الجيبي

V_s هي القيمة الفعالة لجهد المصدر الكهربي الجيبي

I_m هي القيمة العظمى لتيار الحمل الأقصى علما بأن I_m يمكن كتابته في الصورة التالية:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{V_s\sqrt{2}}{R} \quad (٢ - ١٨)$$

القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -٩) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \quad (٢ - ١٩)$$

وأيضا يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \quad (٢ - ٢٠)$$

مثال ٢ -٥:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه من مصدر كهربي له جهد جيبي قيمته الفعالة 150V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل مادي 'R' قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن زاوية إشعال الثايرستور قيمتها 30^o ، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل '$V_{o(avg)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل '$I_{o(avg)}$'.
- قيمة تيار الحمل الأقصى 'I_m'.
- القيمة الفعالة لتيار الحمل '$I_{o(rms)}$'.
- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.
- تردد موجة الخرج 'f_o'.
- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha)$$

$$\therefore V_{o(avg)} = \frac{150\sqrt{2}}{\pi}.(1+\cos 30^o) = 126 \quad \text{V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{126}{10} = 12.6 \text{ A}$$

- القيمة العظمى لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآتي:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{150\sqrt{2}}{10} = 21.2 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآني:

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} = \frac{21.2}{\sqrt{2}}.\sqrt{1-\frac{30}{\pi}.\frac{\pi}{180}+\frac{\sin 60^o}{2\pi}} = 14.77 \text{ A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر يمكن حسابها كالآني:

$$P_L = I_{orms}^2 R = 14.77^2.10 = 2182 \quad \text{W}$$

- حيث أن تردد موجة الخرج تساوي ضعف قيمة تردد المصدر الكهربي الجيبي

$$\therefore f_o = 2f = 2.(60) = 120 \quad \text{Hz}$$

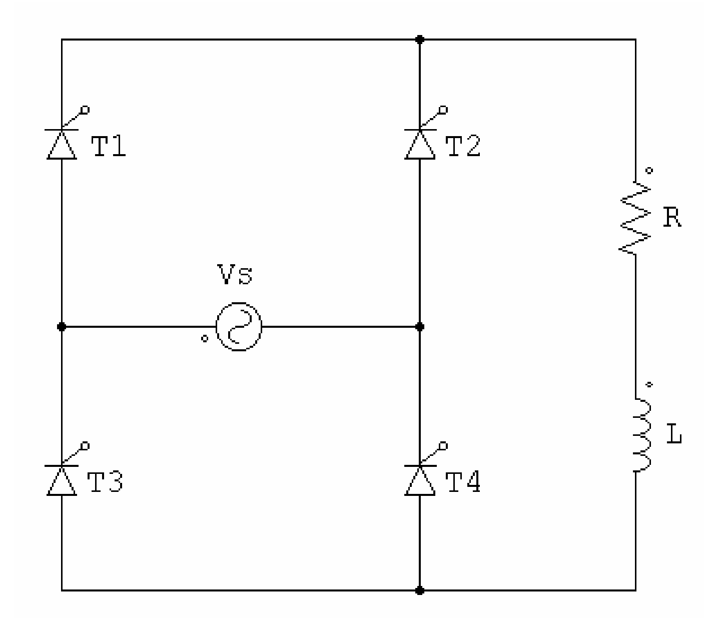
- يمكن حساب معامل القدرة الكهربية كالآتي حيث إن القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' هي القيمة الفعالة لتيار الدخل 'I_s' ولذلك

$$PF = \frac{I_{orms}^2 R}{V_s I_{orms}} = \frac{I_{orms} R}{V_s}$$

$$\therefore PF = \frac{14.77.(10)}{150} = 0.98 \quad \text{Lag.}$$

حالة الحمل الحثي 'R-L'

يبين الشكل (٢ -١١) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه ويتصل هذا الموحد بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي (R-L).

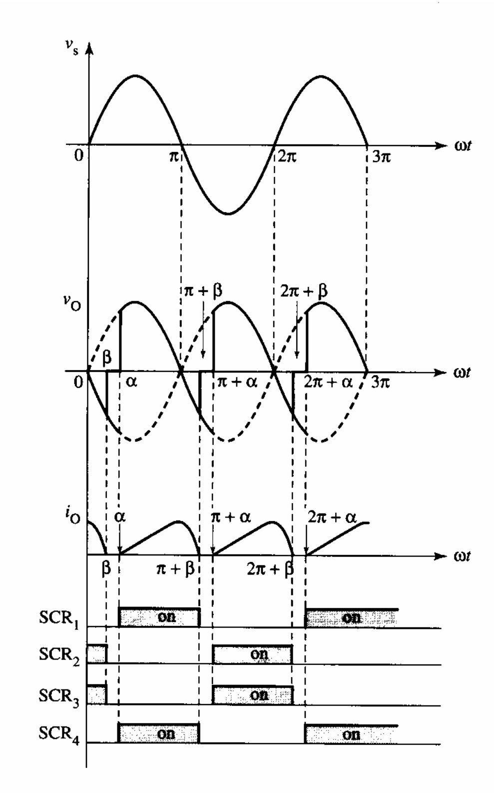


الشكل (٢ -١١): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' .

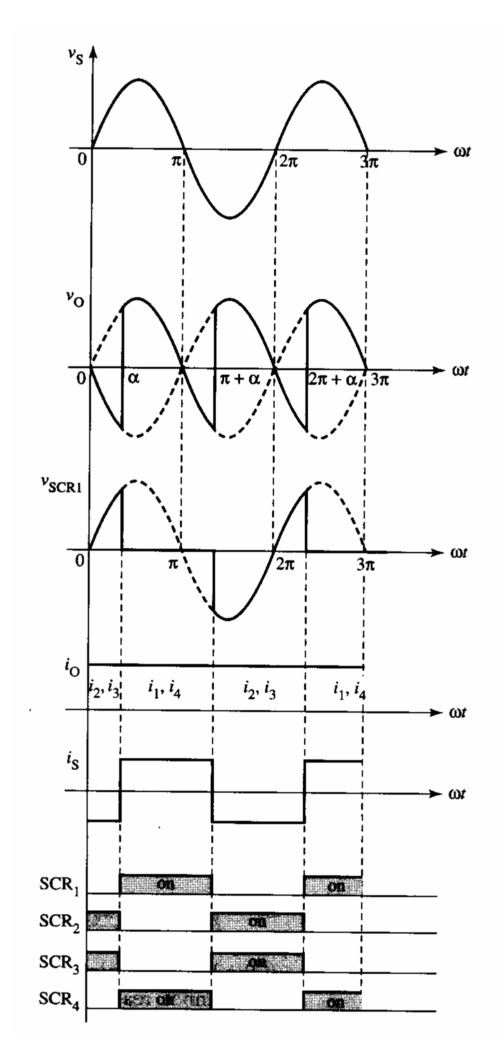
فكرة ومبدأ عمل الدائرة :

كما سبق شرحه في حالة عمل هذه الدائرة بحمل مادي فقط فإن كلا من الثايرستورين T_1,T_4 يوصلان التيار عند زاوية الإشعال أو اللحظة $\omega t = \alpha$ بينما الثايرستوران T_2,T_3 فسوف يوصلا التيار بدءًا من اللحظة أو الزاوية $\omega t = \alpha + \pi$ والشكل (٢ -١٢) يبين الموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد المتصل بحمل حثي. ونلاحظ من هذه الموجات بأنه عند وصول نبضات بزاوية إشعال α لكل من الثايرستورين T_1,T_4 فسوف يمر تيار ومبتدئ بقيمة صفرية في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي 'v_s' لثايرستور T_1 والحمل الحثي و الثايرستور T_4 وتزداد قيمة هذا التيار حتى اللحظة الزمنية $\omega t = \pi$ و يكون له قيمة غير صفرية عند هذه اللحظة الزمنية يعكس الحالة السابقة لهذا الموحد والمتصل بحمل مادي R بينما جهد الخرج يصل قيمته عند هذه اللحظة إلى قيمة صفرية حيث إن جهد الخرج v_o هو نفسه جهد الدخل v_s ونتيجة للطاقة المغناطيسية المختزنة بالملف فإن التيار سوف يواصل المرور ولكن بقيمة تناقصية حتى تنعدم قيمته عند زاوية الإطفاء 'β' ونلاحظ بأن كلا من الثايرستورين T_1, T_4 في حالة الانحياز الأمامي برغم من وجود قيم سالبة لجهد الخرج 'v_o' خلال الفترة الزمنية $\pi < \omega t < \beta$ وهذا يعود إلى الطاقة المختزنة في الملف حيث إن الملف الحثي 'L' دائما ما يسبب جهد عكسي نتيجة لزيادة أو نقصان قيمة التيار. ونلاحظ من الشكل (٢ -١٢) بأنه عند وصول نبضة لكل من الثايرستورين T_2, T_3 عند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi + \alpha$ فإن كلا من هذين الثايرستورين سوف يصبح في حالة الانحياز الأمامي ويمر تيار في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي 'v_s' الثايرستور T_2 و الحمل الحثي والثايرستور

T_3 ويبدأ هذا التيار بقيمة صفرية ويزداد تدريجيا ثم يقل حتى يصل إلى قيمة صفرية مرة أخري عند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi + \beta$ ونلاحظ بأن تيار الخرج عبارة عن موجة مستمرة ودالة غير متصلة وهذا في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية 'ωL' قليلة بينما يكون شكل موجة هذا التيار عبارة عن دالة متصلة وخالية تقريبا من التموجات وذلك في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية عالية جدا بالنسبة لمقاومته المادية حيث تزداد قيمة الطاقة المختزنة والموجودة بالملف بزيادة قيمة الممانعة الحثية للملف وشكلي (٢ -١٢)، (٢ -١٣) يبينا شكل موجات هذه الدائرة وتأثير القيمة الحثية للملف. ونلاحظ من الشكل (٢ -١٢) بأن موجة تيار الخرج عبارة عن موجة تيار مستمر وتتكرر هذه الموجة كل فترة زمنية قيمتها 180^o بينما موجة تيار الدخل أي موجة تيار المصدر الكهربي 'i_s' عبارة عن موجة متناوبة تتكرر كل فترة زمنية قيمتها 360^o ونلاحظ أيضا من الشكل (٢ -١٣) بأن قيمة زاوية الإطفاء 'β' قيمتها $\pi + \alpha$ في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية عالية جدا وشكل موجة الدخل أو موجة المصدر الكهربي عبارة عن موجة مستطيلة الشكل تقريبا بينما شكل موجة تيار الخرج عبارة عن موجة مستمرة خالية من أي تموجات أو مركبات تيار متردد.



الشكل (٢ -١٢): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' ذي ممانعة حثية صغيرة.



الشكل (٢ -١٣): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي ذي ممانعة حثية عالية جدا.

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -١١) وفي حالة الحمل الحثي القليل (حالة الدالة غير المتصلة) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢ -٢١)$$

بينما يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -١١) وفي حالة الحمل الحثي الكبير جدا (حالة الدالة المتصلة) والذي له ممانعة حثية الكبر بكثير من مقاومته المادية كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi}.V_m \cos\alpha \qquad (٢ -٢٢)$$

وحيث أن القيمة المتوسطة لتيار الخرج $I_{o(avg)}$ يساوي $V_{o(avg)}/R$

وبالتالي يمكن كتابة تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -١١) وفي حالة الحمل الحثي القليل (حالة الدالة غير المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi R}.(\cos\alpha - \cos\beta) \quad (٢ -٢٣)$$

و أيضا يمكن كتابة تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢ -١١) وفي حالة الحمل الحثي العالي (حالة الدالة المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{2}{\pi R}.V_m \cos\alpha \quad (٢ -٢٤)$$

نلاحظ من المعادلة (٢ -٢٢) بأن القيمة المتوسطة لجهد الخرج لها قيمة موجبة وذلك عند قدح الثايرستور بزاوية إشعال تقع ما بين 0 و90^o ويعمل الموحد كمحول للجهد المتناوب إلى جهد مستمر (rectifier) بينما عند قدح الثايرستور بزاوية إشعال تقع ما بين 90^o و180^o تكون قيمة جهد الخرج المتوسطة لها قيمة سالبة ويعمل الموحد كمحول عكسي للتيار المستمر (inverter) و يتم خلال هذه الفترة الزمنية استرجاع بعض من القدرة الكهربية إلى المصدر الكهربي وعلى هذا الأساس يعمل موحد موجة كاملة أحادي الوجه والمتصل بحمل حثي كبير جدا في ربعين (2-Quadrant) ويمكن استخدام هذه الأنواع من الموحدات للتحكم في سرعة محركات التيار المستمر والتحكم في اتجاه دورانها في اتجاهين متعاكسين وذلك عن طريق التحكم في قيمة زاوية إشعال الثايرستور.

الجهد الناتج على طرفي الثايرستور V_{AK}:

كما سبق شرحه مسبقا فعندما يكون الثايرستور T_1 فيكون الثايرستور T_2 مفصولاً (مفتوح) والعكس صحيح و لإيجاد فرق الجهد على طرفي أي منهما وليكن الثايرستور T_2 وذلك عندما يكون هذا الثايرستور مفصولاً بينما الثايرستور T_1 مغلق و لإيجاد قيمة فرق الجهد هذه فيمكننا إيجاده بأخذ الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي v_s و الثايرستور T_1 و الثايرستور T_2 وبتطبيق قانون كيرشوف على هذه الدائرة يمكننا الحصول على المعادلة التالية:

$$V_{T2} = V_s + V_{T1} \quad (٢ -٢٥)$$

ونتيجة لمرور التيار عبر الثايرستور T_1 فإن فرق الجهد عليه تقريبا له قيمة صفرية وبالتالي تصبح قيمة فرق الجهد على الثايرستور T_2 يساوي قيمة جهد المصدر الكهربي v_s أي أن $V_{T2} = V_s$.

مثال ٢ -٦:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربي أحادى الوجه ذي جهد جيبي قيمته الفعالة 230V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية 'ωL >> R' وقيمة مقاومته المادية 0.5 Ω. أوجد قيمة زاوية إشعال الثايرستور عندما تكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل 200 V.

الحل:

يمكن إيجاد قيمة زاوية إشعال الثايرستور في الحمل الحثي الذي له ωL >> R مستخدما المعادلة (٢ -٢٢) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi}.V_m \cos\alpha$$

$$\therefore 200 = \frac{2}{\pi}.(230\sqrt{2}).\cos\alpha$$

$$\therefore \cos\alpha = 0.966 \qquad \therefore \alpha = 15^o$$

مثال ٢ -٧:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربي أحادي الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة 120V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية'ωL >> R' وقيمة مقاومته المادية 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية إشعال الثايرستور 30^o، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل'$V_{o(avg)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل '$I_{o(avg)}$'.
- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.
- القيمة الفعالة لتيار الحمل '$I_{o(rms)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الخاص بكل ثايرستور 'I_{oTh}'.
- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.
- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربي والحمل 'V_m'

$$V_m = V_s\sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 170 \ \text{V}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج (الحمل)

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi}.V_m \cos\alpha = \frac{2}{\pi}.170.\ \cos 30^o = 94\ \text{V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{94}{10} = 9.6\ \text{A}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل في حالتنا هذه هي القيمة العظمى لتيار الحمل حيث إن شكل موجة الحمل لها قيمة ثابتة وبالتالي:

$$I_m = I_{o(avg)} = 9.4\ \text{A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل يساوي أيضا القيمة المتوسطة لتيار الحمل في حالتنا هذه وبالتالي:

$$I_{orms} = I_{o(avg)} = 9.4\ \text{A}$$

- حيث أن كل ثايرستور يوصل نصف دورة '180^{o}' كل دورة وبالتالي تكون القيمة المتوسطة لتيار أي ثايرستور تساوي نصف القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{oTh} = \frac{1}{2} I_{o(avg)} = \frac{9.4}{2} = 4.7\ \text{A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر

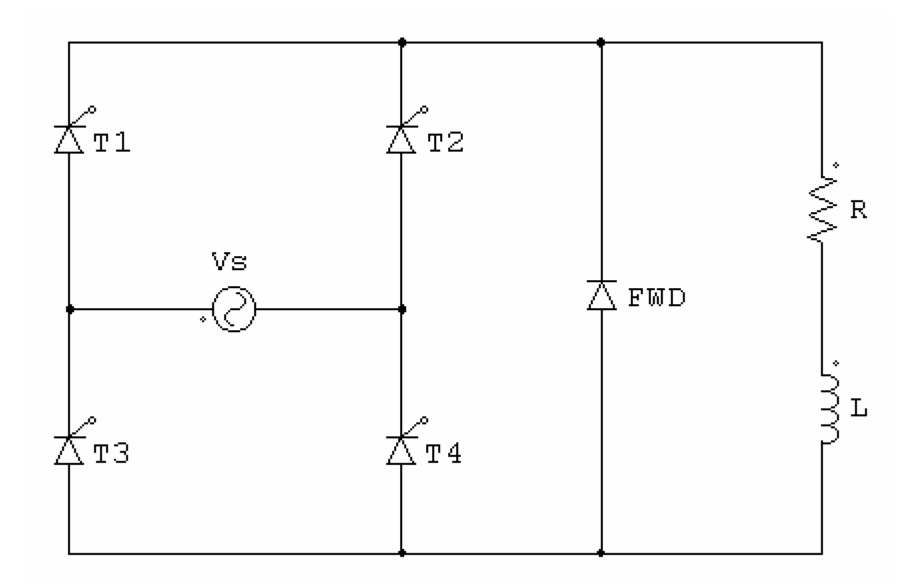
$$P_L = I^2_{orms} R = 9.4^2.10 = 883.3\ \text{W}$$

- حيث أن القيمة الفعالة لتيار الحمل هي نفسها القيمة المتوسطة لتيار الحمل وبالتالي يمكن تعيين معامل القدرة الكهربية للمصدر الكهربي كالآتي:

$$PF = \frac{I^2_{orms} R}{V_s I_{orms}} = \frac{I_{orms} R}{V_s} = \frac{94}{120} = 0.78\ \ \text{Lag.}$$

حالة الحمل الحثي مع وجود دايود حدافه:

كما سبق دراسته من الدائرة السابقة والمبينة بالشكل (٢ -١١) بأن لها بعض المزايا وبعض العيوب وأهم ميزة للدائرة هو إمكانية التحكم في الخرج (الحمل) في اتجاهين و وجود قيمة سالبة في موجة جهد الخرج يعتبر من أهم عيوب الدائرة. وهذا الجزء السالب يؤدي إلى تقليل القيمة المتوسطة لجهد الخرج ويمكن التغلب على هذا العيب بوضع دايود حذافة على التوازي مع أطراف الحمل كما هو مبين بالدائرة الموضحة بالشكل (٢ -١٤) لإزالة هذا الجزء السالب من موجة خرج الجهد.



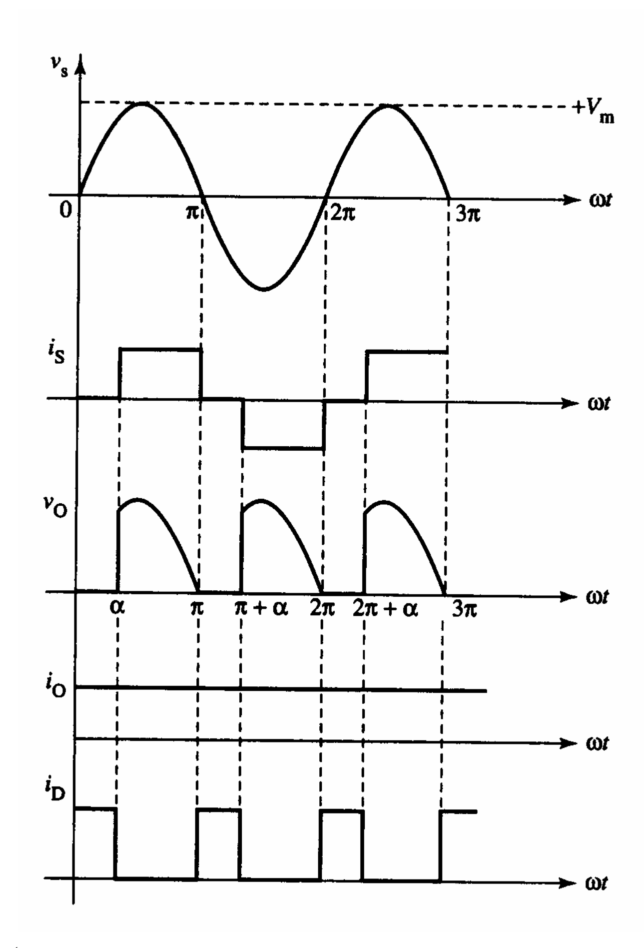
الشكل (٢ -١٤): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي و دايود حدافه.

فكرة ومبدأ عمل الدائرة

يمكن شرح مبدأ عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٤) بالاستعانة بموجات الدائرة والمبينة بالشكل (٢ -١٥) و بفرض أن الدائرة متصلة بحمل حثي له ممانعة حثية اكبر بكثير من مقاومته المادية '$\omega L >> R$' وعلى أساس هذا الفرض فيمكن شرح الدائرة كالآتي:

عندما يتم إعطاء نبضة كهربية لبوابات كل من الثايرستورين T_1,T_4 فسوف يوصلان التيار عند زاوية الإشعال أو اللحظة $\omega t = \alpha$ ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربي 'v_s' والثايرستور T_1 والحمل الحثي و الثايرستور T_4 ويستمر مرور هذا التيار بقيمة ثابتة حتى اللحظة الزمنية $\omega t = \pi$ ونلاحظ خلال هذه الفترة الزمنية ($\alpha \le \omega t \le \pi$) بأن الدايود الحذافة في وضع انحياز خلفي ولا يمر فيه أي تيار تقريبًا. نلاحظ من موجتي خرج التيار والجهد بأن هذا التيار مازال له نفس القيمة حتى اللحظة $\omega t = \pi$ لوجود الحمل الحثي برغم من وصول قيمة جهد الخرج لقيمة صفرية عند هذه اللحظة الزمنية ونلاحظ أيضا إزالة أي جزء سالب في موجة خرج الجهد نتيجة لوجود الدايود الحذافة في الدائرة خلال الفترة الزمنية ($\pi \le \omega t \le \pi + \alpha$) حيث يكون هذا الدايود في وضع انحياز أمامي ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايود الحذافة حيث يكون جميع الثايرستورات مغلقة خلال هذه الفترة الزمنية وتكون قيمة تيار المصدر الكهربي 'i_s' صفرية خلال هذه الفترة الزمنية بينما تكونا قيمة تيار الحمل لها نفس القيمة الثابتة للتيار خلال هذه الفترة الزمنية وعند اللحظة '$\omega t+\pi$' سوف تأتي نبضة كهربية لكلا من بوابتي الثايرستوران T_2, T_3 ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من

المصدر الكهربي و الثايرستور T_2 والحمل الحثي و الثايرستور T_3 محتفظا تيار الحمل بنفس قيمته السابقة بينما تكون قيمة جهد الحمل هي نفسها قيمة جهد المصدر ولكن بإشارة سالبة '$v_o = - v_s$' ويستمر هذا الوضع حتى اللحظة $\omega t = 2\pi$ وعند هذه اللحظة سوف يتم توصيل الدايود الحذافة مرة أخرى حتى اللحظة $\omega t = 2\pi + \alpha$ ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايود الحذافة بنفس قيمة تيار الحمل السابقة بينما تكون قيمة جهد الحمل صفرية وقيمة تيار المصدر أيضا له قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية ثم يتكرر عمل الدائرة مرة أخرى عند إعطاء نبضة كهربية لبوابات كل من الثايرستورين T_1,T_4. نلاحظ من الشكل (٢ -١٥) بأن موجة تيار الحمل عبارة عن تيار له قيمة ثابتة وعلى شكل دالة متصلة بينما موجة تيار المصدر الكهربي عبارة عن شكل موجة مربعة بقيمة ثابتة ولكن له دالة غير متصلة والفترات الزمنية التي لا يمر فيها تيار خلال المصدر سوف يمر فيها تيار في الدايود الحدافه.



الشكل (٢ -١٥): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي له ممانعة حثية عالية جدًا مع دايود حدافه.

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

بمقارنة موجتي جهد خرج الحمل بالشكلي (٢ -١٠)، (٢ -١٥) نلاحظ أنهما لهما نفس شكل الموجة وبالتالي يمكن تمثيل المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لجهد الخرج في حالتنا هذه بنفس المعادلة الرياضية في حالة توصيل هذه الدائرة بحمل مادي فقط (معادلة (٢،١٥)) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -٢٦)$$

وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{\pi R}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -٢٧)$$

القيمة المتوسطة لتيار الدايود الحدافه

حيث أن شكل موجة الدايود الحذافة الشكل (٢ -١٥) هي جزء من موجة تيار الحمل وبالتالي يمكن كتابة معادلة القيمة المتوسطة لتيار للدايود الحذافة في حالة وجود حمل حثي له ممانعة حثية كبيرة جدًا بالنسبة إلى قيمة مقاومته المادية عن طريق حسابه في دورة زمنية كاملة أي كل 2π حيث يمر التيار خلال الدايود الحذافة كل فترة زمنية تقدر بقيمة زاوية الإشعال α في كل دورة زمنية كاملة وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار للدايود الحذافة كالآتي:

$$I_{D(avg)} = I_{o(avg)}.\frac{\alpha}{\pi} = \frac{\alpha\, V_m}{\pi^2 R}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -٢٨)$$

مثال ٢ -٨:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربي أحادي الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة 120V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية '$\omega L >> R$' وقيمة مقاومته المادية $10\ \Omega$ مع دايود حدافه. إذا علمت بأن قيمة زاوية إشعال الثايرستور 30^o، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل 'V_o'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل '$I_{o(avg)}$'
- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.
- القيمة الفعالة لتيار الحمل 'I_{orms}'.
- القيمة المتوسطة لتيار المار بالدايود الحذافة '$I_{D(avg)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الخاص بكل ثايرستور 'I_{oTh}'.

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.
- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربي والحمل 'V_m'

$$V_m = V_s\sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 170\ \text{V}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج (الحمل)

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) = \frac{170}{\pi}.(1+\cos 30^0) = 101\ \ \text{V}$$

- قيمة تيار الحمل المتوسط

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{101}{10} = 10.1\ \text{A}$$

- قيمة تيار الحمل المتوسط في حالتنا هذه هي قيمة تيار الحمل الأقصى حيث إن شكل موجة الحمل لها قيمة ثابتة وبالتالي

$$I_m = I_{o(avg)} = 10.1\ \text{A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل هي نفس قيمة تيار الحمل المتوسط في حالتنا هذه

$$I_{orms} = I_{o(avg)} = 10.1\ \ \text{A}$$

- القيمة المتوسطة للدايود الحدافه

$$I_{D(avg)} = I_{o(avg)}.\frac{\alpha}{\pi} = 10.1\,(\frac{30}{180}) = 1.683\ \ \text{A}$$

- كل ثايرستور سوف يوصل كل 180^o حيث إن زاوية إشعال الثايرستور تساوي 30^o وبالتالي يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار أي ثايرستور كالتالي

$$I_{oTh} = \frac{(\pi-\alpha)}{2\pi}.I_{o(avg)} = \frac{150}{360}.(10.1) = 4.21\ \ \text{A}$$

- القدرة المسحوبة من المصدر

$$P_L = I^2_{orms}R = (10.1)^2.10 = 1020\ \ \text{W}$$

- معامل القدرة الكهربية يعين كالآتي:

$$PF = \frac{P_L}{V_s I_{srms}} = \frac{1020}{120 I_{srms}} \qquad \text{(I)}$$

حيث أن $I_{s(rms)}$ هي القيمة الفعالة لتيار المصدر الكهربي وتعين كالآتي:

$$I_{srms} = I_{o(avg)}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} = 10.1\sqrt{\frac{150}{180}} = 9.22\ A \qquad \text{(II)}$$

بالتعويض من معادلة (II) في العادلة (I) ينتج أن:

$$PF = \frac{1`020}{120\ .(9.22)} = 0.92 \quad \text{Lag.}$$

نلاحظ من نتائج هذا المثال والمثال السابق أن معامل القدرة الكهربية في حالة وجود الدايود الحذافة لموحد موجة كاملة محكومة كليًا يكون له قيمة أفضل من حالة عدم وجود الدايود الحذافة برغم أن موجة تيار المصدر الكهربي تكون على شكل دالة غير متصلة.

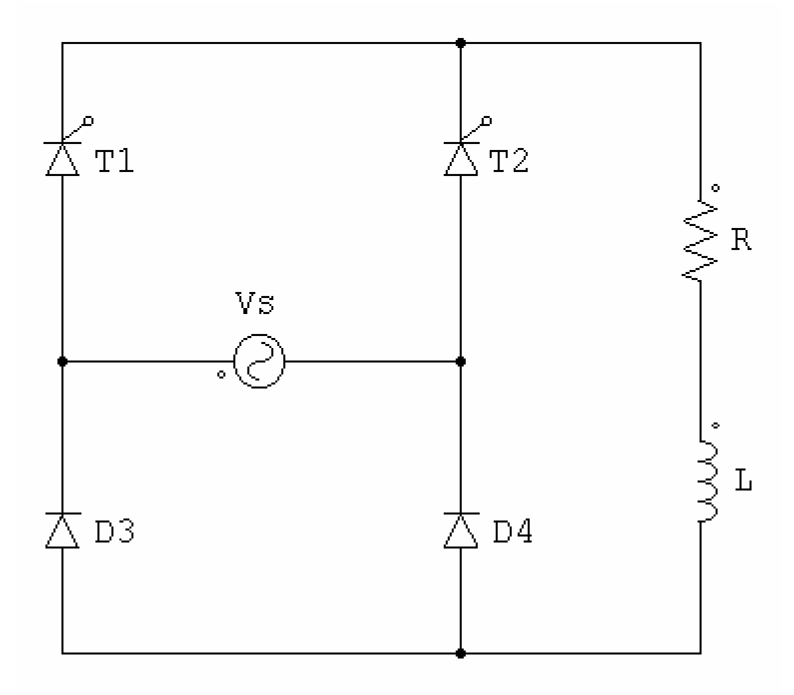
موحدات موجة كاملة نصف محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي 'R-L'

Single-Phase Full-Wave Half-Controlled Rectifiers with an Inductive Load

كما تم شرحه مسبقا في حالة موحد موجة كاملة محكوم كليًا فإن هذا الموحد يمكن أن يكون له قيمة موجبة أو قيمة سالبة لجهد الحمل المتوسط حيث عند عمله بقيمة موجبة لهذا الجهد فإن الموحد سوف يغذي القدرة الكهربية من مصدر الجهد المتناوب إلى الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد بينما عند عمله بقيمة سالبة لجهد الحمل المتوسط فإن الموحد سوف يعكس اتجاه القدرة أي يتم تحويل اتجاه القدرة من الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد إلى مصدر الجهد المتناوب أي أن الموحد موجة كاملة المحكوم كليًا يمكن عملة في اتجاهين أو ربعين مختلفين ولكن في بعض التطبيقات العملية يتطلب اتجاه سريان وحيد للقدرة وتكون من مصدر الجهد المتناوب إلى الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد و يمكن تسمية هذا النوع من الموحدات بالموحد الذي يعمل في ربع واحد (1-Quadrant) والشكل (٢ -١٦) يبين شكلا أساسيا من أشكال دائرة الموحد القنطري ونلاحظ أن شكل الدائرة المبينة بشكل (٢ -١٦) يختلف عن شكل الدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٠) حيث تم إحلال كلا من الثايرستوران T_3, T_4 بالديودان D_3, D_4 كما مبين بشكل (٢ -١٦).

مبدأ عمل دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه

يمكن شرح مبدأ عمل الدائرة بالاستعانة بموجات الدائرة والمبينة بالشكل (٢ -١٧) وبفرض أن الدائرة متصلة بحمل حثي له ممانعة حثية اكبر بكثير من مقاومته المادية '$\omega L >> R$' وعلى أساس هذا الفرض فيمكن شرح الدائرة كالآتي:



شكل (٢ -١٦): دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' .

عند إعطاء نبضة كهربية لبوابة الثايرستور T_1 بزاوية إشعال α في نصف الموجب لدورة جهد المصدر الجيبي المتناوب فسوف يوصل الثايرستور ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المتناوب 'v_s' و الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الدايود D_4 ويستمر مرور التيار في الدائرة حتى اللحظة $\omega t = \pi$ أي أن التيار سوف يمر في هذه الدائرة خلال الفترة الزمنية $\alpha \le \omega t \le \pi$ ويكون تيار الخرج 'i_o' له نفس قيمة تيار المصدر الجيبي المتناوب 'i_s' خلال هذه الفترة الزمنية ويكون أيضا شكل موجة جهد الحمل لها نفس شكل موجة جهد المصدر الجيبي خلال هذه الفترة الزمنية ونلاحظ بأن قيمة جهد الحمل عند اللحظة $\omega t = \pi$ له قيمة صفرية ولا يمكن أن يصل قيمة جهد الحمل إلى قيمة سالبة بعد هذه اللحظة الزمنية حيث إن تيار الحمل 'i_o' سوف يتحول مروره من الدائرة السابقة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الثايرستور 'T_1' و الحمل الحثي و الدايود D_3 ويستمر مرور هذا التيار في الحمل الحثي حتى اللحظة $\omega t = \pi + \alpha$ و تكون قيمة تيار المصدر الجيبي المتناوب يساوي قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية و أيضا قيمة جهد الخرج يساوي قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية وبالتالي يقوم كل من الثايرستور و الدايود بعمل الدايود الحذافة في الدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٤). وعند إعطاء نبضة كهربية لبوابة الثايرستور عند اللحظة فسوف يتحول مرور التيار من الدائرة المغلقة السابقة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المتناوب 'v_s' و الثايرستور T_2 والحمل الحثي و الدايود D_3 ويستمر مرور التيار في هذه الدائرة حتى اللحظة $\omega t = 2\pi$ أي أن التيار سوف يمر في هذه الدائرة خلال الفترة الزمنية $\pi + \alpha \le \omega t \le 2\pi$ وتكون

قيمة تيار الحمل خلال هذه الفترة مساوية لقيمة تيار المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة حيث يمر تيار المصدر الجيبي في اتجاه عكسي وهذا أيضا ينطبق على جهد الحمل والذي له نفس قيمة جهد المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة وخلال الفترة الزمنية $2\pi \le \omega t \le 2\pi + \alpha$ سوف يتحول مرور التيار من هذه الدائرة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الثايرستور T_2 والحمل الحثي و الدايود D_4 ونلاحظ بأن قيمة تيار المصدر الكهربي قيمته صفرية خلال هذه الفترة الزمنية وأن كلا من الثايرستور T_2 و الدايود D_4 يقوما بعمل الدايود الحذافة في الدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٤).

نلاحظ بأن تيار الحمل له قيمة ثابتة وتيار المصدر الجيبي المصدر له شكل موجة مربعة وأن موجة هذين التيارين يمكن الحصول عليهما باستخدام الدائرة المبينة بشكل (٢ -١٤) وبالتالي تكون هاتان الدائرتان متكافئين.

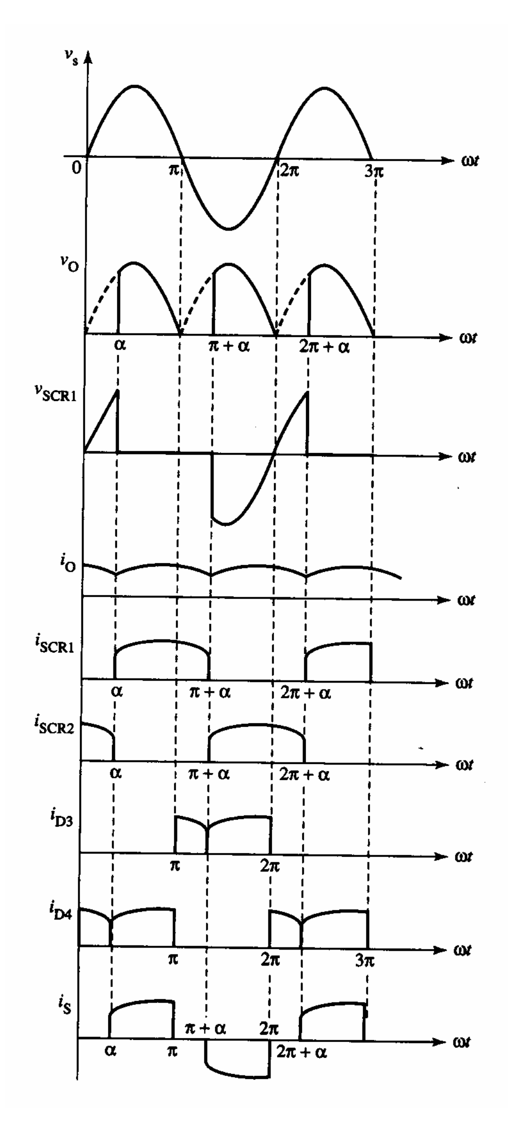
القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل

حيث أن دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم والمبينة بشكل (٢ -١٦) تقوم بنفس وظيفة الدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٤) و بالتالي تصبح معادلات القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل هي نفس المعادلات (٢ -٢٦) , (٢ -٢٧) للدائرة المبينة بالشكل (٢ -١٤) وهما:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -٢٩)$$

وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi R}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢ -٣٠)$$



الشكل (٢ -١٧): الموجات المصاحبة لدائرة موحد قنطرة نصف محكوم كامل الموجة متصل بحمل حثي له ممانعة حثية عالية جدا.

مثال ٢ -٩:

ارسم شكل موجة الخرج 'v_o' لدائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه والمبينة بالشكل (٢ -١٦) الموجة من مصدر كهربي أحادى الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة 120V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية '$\omega L >> R$' وقيمة مقاومته المادية 10 Ω عندما تكون قيمة زاوية إشعال الثايرستور:

(أ) $\alpha = 0$.

(ب) $\alpha = 45^o$.

(ج) $\alpha = 90^o$.

(د) $\alpha = 135^o$.

الحل:

كما سبق شرحه وتفسيره بأن موجة خرج جهد الحمل لدائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه تخلو من وجود أي جزء سالب سواء في حالة الحمل المادي أو الحمل الحثي وموجة جهد الحمل تكون محكومة عن طريق زاوية الإشعال α.

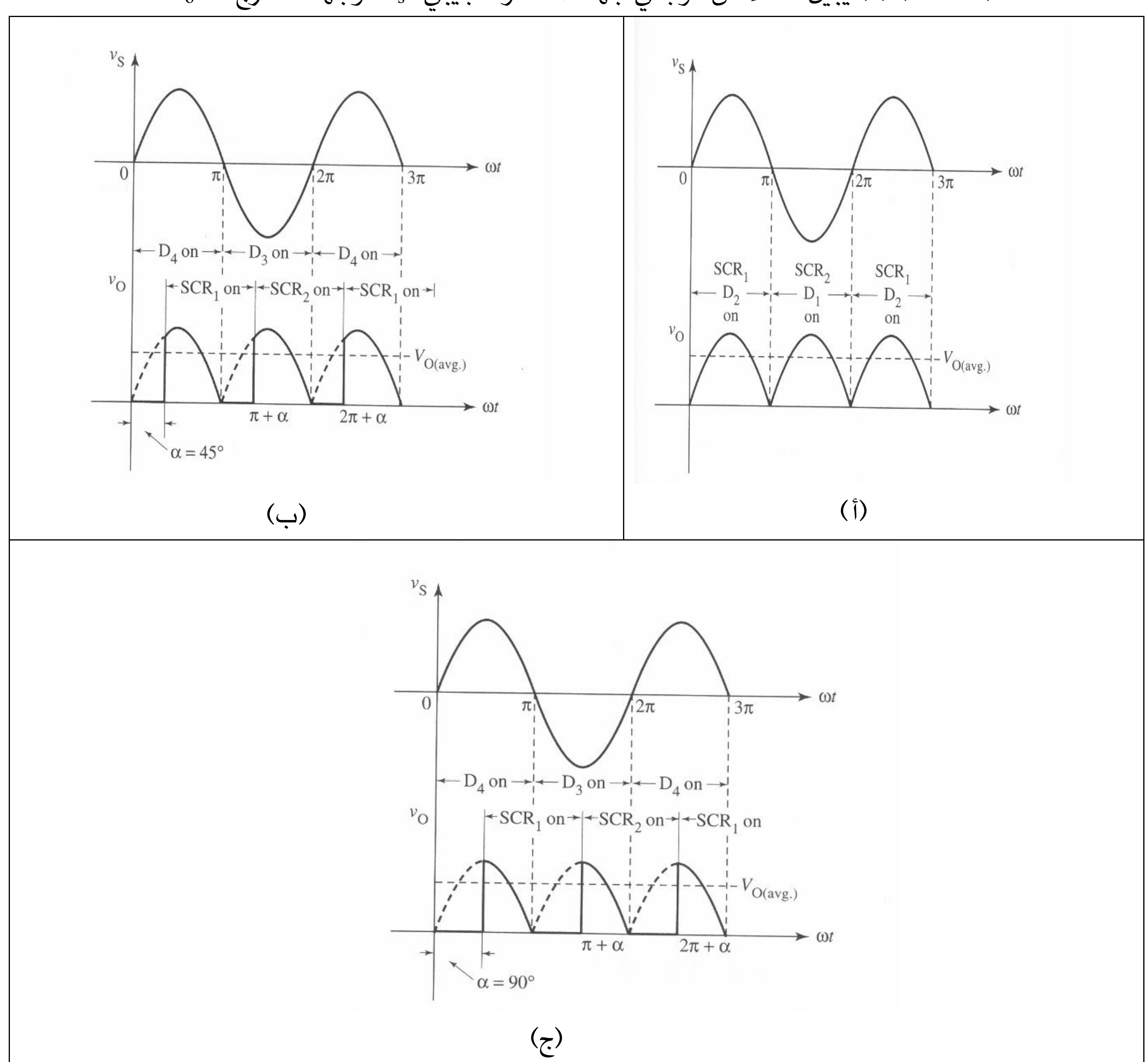
(أ) خلال نصف الموجة الموجب لموجة مصدر الجهد المتناوب يكون كلا من الثايرستور T_1 والدايود D_4 في حالة توصيل حيث يبدأ التوصيل عند زاوية الإشعال $\alpha = 0$ وتصبح قيمة جهد الخرج مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي وخلال النصف السالب لموجة مصدر الجهد المتناوب يكون كلا من الثايرستور T_2 و الدايود D_3 في حالة توصيل وتصبح قيمة جهد الخرج مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة وشكل (٢ -١٨) (أ) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي 'v_s' وجهد الخرج 'v_o'.

(ب) عند قدح الثايرستور بزاوية الإشعال فإن كلا من الثايرستورT_1 و الدايود D_4 سوف يوصلان ويبدأ التوصيل ابتداء من اللحظة $\omega = 45^o$ حتى اللحظة $\omega = \pi$ بينما خلال الفترة الزمنية $0 \le \omega t \le 45^o$ تصبح قيمة جهد الخرج له قيمة صفرية نتيجة لعدم وجود أي نبضة كهربية عند طرف بوابة الثايرستور T_1 و أيضا تصبح قيمة جهد الخرج 'v_o' له قيمة صفرية خلال الفترة الزمنية $\pi \le \omega t \le 225^o$ حتى تأتي نبضة كهربية لبوابة الثايرستور T_2 وعندما تأتي هذه النبضة فإن كلا من الثايرستور T_2 و الدايود D_3 سوف يوصلا وتصبح قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الجيبي المتناوب ولكن بإشارة سالبة وشكل (٢ -١٨) (ب) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي 'v_s' وجهد الخرج 'v_o'.

(ج) كما شرحه بالتفصيل بالأجزاء (أ) و (ب) يمكن استنتاج موجة خرج الحمل كالتالي:

خلال الفترة الزمنية $0 \le \omega t \le 90°$ تكون قيمة جهد الخرج لها صفرية وتكون قيمة هذا الجهد خلال الفترة الزمنية $90^o \le \omega t \le 180^o$ مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي المتناوب ويكون كل من الثايرستورT_1 و الدايود D_4 في حالة توصيل للتيار الكهربي و أيضا يصبح قيمة جهد الخرج له قيمة صفرية خلال الفترة الزمنية $180^o \le \omega t \le 270^o$ ثم يصبح له قيمة مساوية و بإشارة سالبة لقيمة جهد المصدر الكهربي الجيبي خلال الفترة الزمنية $270^o \le \omega t \le 360^o$ و يبين شكل (٢ -١٨) (ج) كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي 'v_s' وجهد الخرج 'v_o'.

(د) كما شرحه بالتفصيل بالأجزاء (أ)، (ب) و (ج) يمكن استنتاج موجة خرج الحمل والشكل (٢ -١٨) (د) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي 'v_s' وجهد الخرج 'v_o'.



شكل (٢ -١٨): موجة جهد المصدر الجيبي وموجة جهد الخرج لموحد قنطرة نصف محكوم كامل الموجة متصل بحمل حثي له ممانعة حثية عالية جدا.

أسئلة و تمارين:

٢ -١ ارسم شكل موجات كل من جهد المصدر المتناوب 'v_s' وجهد خرج الحمل 'v_o' وتيار الحمل 'i_o' وفرق الجهد عبر أطراف الثايرستور 'v_{AK}' في حالة :

أ - دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل مادي 'R'

ب - دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل حثي في حالة وجود وعدم وجود الدايود الحدافه.

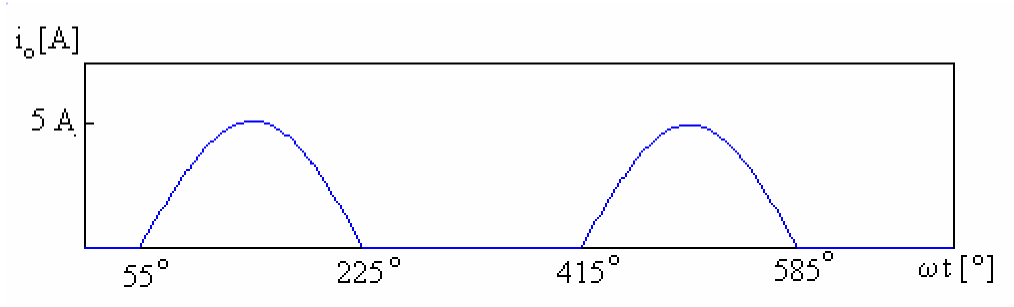
٢ -٢ ارسم شكل للعلاقة المتوقعة لجهد الحمل المتوسط '$V_{o(avg)}$' مع زاوية الإشعال 'α' في حالة وجود دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل مادي بفرض القيمة الفعالة لجهد المصدر الكهربي 220V .

٢ -٣ hفترض أن موجة تيار الخرج (الحمل) 'i_o' لدائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور هي تلك الموجة المبينة بالشكل التالي المبين. أوجد قيمة:

أ - زاوية الإشعال 'α'

ب - زاوية التوصيل 'γ'

ج - زاوية الإطفاء 'β'.



٢ -٤ ما هي وظيفة الدايود الحذافة المستخدم لدائرة الموحد نصف الموجة المحكوم أحادd الطور؟ هل يستخدم الدايود الحذافة في حالة وجود الأحمال المادية؟ هل يستخدم هذا الدايود الحذافة في حالة وجود أحمال حثية؟.

٢ -٥ ما هو تأثير زيادة القيمة الحثية 'L' للحمل في حالة الموحدات القنطرية المحكومة أحادية الطور والمتصلة بأحمال حثية ؟ بين إجابتك مستعينا بموجات خرج التيار 'i_o'.

٢ -٦ اشرح مبدأ عمل الموحد القنطري المحكوم أحادي الطور والمتصل بحمل حثي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية ($\omega L>>R$) في حالة :

أ - عدم وجود دايود حدافه.

ب - وجود دايود حدافه.

٢ -٧ ارسم شكل موجة كل من جهد الحمل 'v_o' وتيار الحمل 'i_o' وتيار المصدر 'i_s' للموحد القنطري كامل الموجة فى حالة :

أ - حمل مادي وزاوية اشعال '60°'.

ب - حمل حثي وزاوية اشعال '60°'.

٢ -٨ يتصل موحد محكوم كامل الموجة أحادي الطور بمصدر جهد متناوب جهده الفعال 220V وتردده 60Hz وحمل مادي مقاومته $50\ \Omega$. إذا علمت بأن زاوية إشعال قيمتها '60°' فأوجد:

أ - القيمة المتوسطة لتيار الحمل

ب - القيمة الفعالة لتيار الحمل

ج - القدرة المغذاة للحمل

د - معامل القدرة الكهربية.

٢ -٩ يغذي موحد قنطري كامل الموجة أحادي الطور والمتصل بدايود حذافة حملاً حثياً له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية. يتصل الموحد بمصدر جهد متناوب قيمته الفعالة 220V وتردده 60Hz وحمل مادي مقاومته $50\ \Omega$. إذا كانت قيمة زاوية الإشعال '60°'. فأوجد

أ - القيمة المتوسطة لجهد الحمل

ب - القيمة المتوسطة لتيار الحمل

ج - القيمة الفعالة لتيار الحمل

د - القدرة المغذاة للحمل

ه - التيار المتوسط للموحد السليكوني المحكوم (الثايرستور)

و - التيار المتوسط للدايود الحدافه.

٢ -١٠ يتصل موحد قنطري كامل الموجة محكوم أحادي الطور بحمل له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية ومصدر جهد متناوب قيمته الفعالة 220V وتردده 60Hz . إذا علمت بأن قيمة الحمل المادية 20 Ω وقيمة زاوية الإشعال '60°'. فأوجد قيمة:

أ - تيار الثايرستور المتوسط

ب - أقصى تيار وأقصى جهد للثايرستور

ج - القدرة المغذاة للحمل



إلكترونيات القوى

مقطعات التيار المستمر

مقطعات التيار المستمر

٣

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة_لابد أن يكون الطالب ملما وقادرا على تفسير التالي:

- ما المقصود بمعنى مقطع تيار مستمر
- وصف مبدأ عمل مقطع التيار المستمر الرئيسية
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لمقطع التيار المستمر والخافض للجهد
- مبدأ عمل مقطع التيار المستمر والخافض للجهد والمتصل بحمل مادي أو حمل حثي.

مقدمة :

علمنا من دراسة الوحدة السابقة بأن هناك العديد من الدوائر للموحدات المحكومة أحادية وثلاثية الأوجه وقد تم الاكتفاء بدراسة دوائر الموحدات المحكومة أحادية الوجه والهدف من استخدام هذه الموحدات هو تحويل مصادر الجهد المتناوب إلى جهد مستمر وتتغير قيمة الجهد المستمر عن طريق التحكم في قيمة زاوية إشعال الثايرستور وقد أمكن الحصول على جهد مستمر متغير عند أطراف الخرج والحمل وبالتالي يمكن أن نستفيد بهذا الجهد المتغير في التحكم في سرعة محركات التيار المستمر على سبيل المثال وأيضا يمكن استخدام هذه الموحدات كدوائر إلكترونية لشحن البطاريات. ويمكن التحكم أيضا في سرعات محركات التيار المستمر عن طريق استخدام بعض الأجهزة الإلكترونية والتي تسمى بمقطعات التيار المستمر حيث تحول هذه المقطعات الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة بترددات ثابتة أو ترددات متغيرة عن طريق التحكم في دورة التشغيل (duty cycle) وتتكون هذه المقطعات من عدد من الثايرستورات أو عدد من الترانزستورات. و تنقسم مقطعات التيار المستمر إلى نوعين أساسيين:

- مقطعات خافضة للجهد step-down (buck) choppers والتي تحول الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة وبقيمة اقل من جهد الدخل.
- مقطعات رافعة للجهد step-up (boost) chopper والغرض من هذه المقطعات هو الحصول على قيم جهد مستمر متغير له قيمة أكبر من قيمة الجهد المستمر الثابت.

مقطع التيار المستمر الأساسي A Basic DC Chopper :

يبين الشكل (٣ -١) مخططاً توضيحياً لمقطع التيار المستمر الرئيسي حيث يكون المفتاح الإلكتروني S متصلاً على التوالي مع مصدر جهد مستمر 'V_s' وحمل مادي R. ويمكن أن يكون المفتاح الإلكتروني عبارة عن موحد سليكوني محكوم أي ثايرستور'Thyristor' أو ترانزستور القوى ' Power Transistor' أو موسفت 'MOSFET' أو ترانزستور البوابة ثنائية القطبية 'Insulated Gate Bipolar Transistor' وهكذا.

ومن خلال هذا الفصل سوف نعتبر بأن جميع المفاتيح الإلكترونية 'switches' عبارة عن عناصر مثالية 'ideal' وأن هذه المفاتيح لها الخواص التالية:

- تكون قيمة المقاومة الداخلية لها صفرية وبالتالي فرق الجهد عليها يكون له أيضا قيمة صفرية وذلك عندما تكون هذه المفاتيح مغلقة 'turn-on'.
- تكون قيمة المقاومة الداخلية لها كبيرة جدا أي لانهائية وذلك عندما تكون هذه المفاتيح مفصولة 'turn-off'.
- يكون زمن الإغلاق والفتح لهذه المفاتيح له قيمة صفرية.

و بناءًا على الافتراضات السابقة تكون قيمة الفقد 'power loss' لهذه المفاتيح لها قيمة صفرية وتصبح قيمة القدرة الداخلة المستمرة 'Input dc power' مساوية لقيمة القدرة الخارجة ' output dc power' أي أن:

$$V_s I_s = V_o I_o \qquad (٣ -١)$$

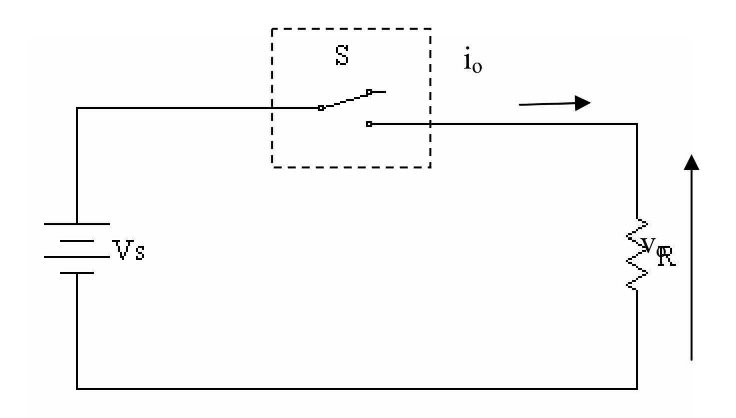
حيث أن:

V_s : هي قيمة جهد المصدر المستمر.

V_o : هي القيمة المتوسطة لجهد الخرج "الحمل".

I_s : هي القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربي.

I_o : هي القيمة المتوسطة لتيار.



الشكل (٣ -١): شكل توضيحي لمقطع تيار مستمر متصل بمقاومة مادية R.

دورة التشغيل Duty Cycle:

يمكن الحصول على القيمة المطلوبة لجهد الخرج المستمر عن طريق التحكم في زمن فصل 'T_{OFF}' وزمن الإغلاق 'T_{ON}' للمفتاح الإلكتروني حيث يتم التحكم في إغلق وفتح المفتاح عن طريق إعطاء نبضة كهربية لدائرة التحكم الخاصة بهذا المفتاح ويبين الشكل (٣ -٢) شكل النبضة المعطاة للمفتاح وتتبع هذه النبضة الطريقة المعروفة بطريقة تعديل عرض النبضة 'Pulse-Width Modulation' وتكون عرض النبضة 'T_{ON}' متغير في هذه الطريقة حيث إن هذا الزمن يمثل زمن إغلق المفتاح الإلكتروني بينما الزمن الدوري 'T' لهذه النبضة ثابت ويمثل هذا الزمن زمن الفتح والغلق '$T_{OFF} + T_{ON}$' للمفتاح الإلكتروني. وتعرف دورة التشغيل 'D' بأنها عبارة عن قيمة زمن إغلق المفتاح الإلكتروني مقسوم على الزمن الدوري ويمكن كتابة الصيغة الرياضية لدورة التشغيل كالتالي:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{T_{ON}}{T} \qquad (٣ -٢)$$

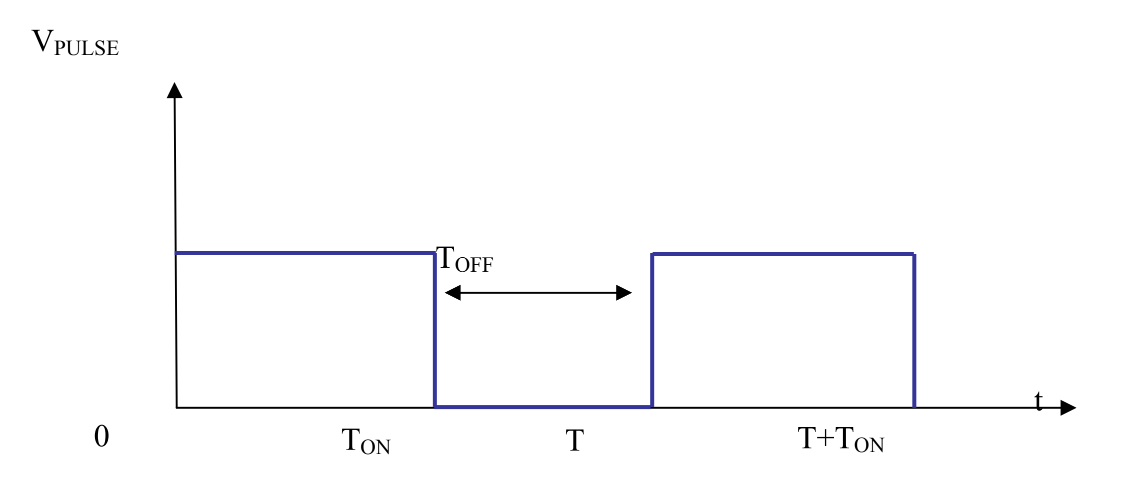
حيث أن:

D: هي نسبة القطع.

T: هي الزمن الدوري للمفتاح الإلكتروني.

T_{ON}: هي زمن إغلق المفتاح الإلكتروني.

T_{OFF}: هي زمن فصل المفتاح الإلكتروني.



الشكل (٣ -٢): نموذج لنبضة يعمل بطريقة تعديل عرض النبضة.

نلاحظ من المعادلة (٣ -٢) بأن قيم دورة التشغيل تتراوح ما بين الصفر والواحد $(0 \le D \le 1)$ حيث دورة التشغيل تساوي صفراً عندما زمن إغلق المفتاح يساوي أيضا صفراً وهذا يحدث عندما يكون المفتاح مفصولاً كليا ودورة التشغيل تساوي الواحد عندما زمن فصل المفتاح يساوي أيضا واحداً وهذا يحدث عندما يكون المفتاح مغلقاً كليا. ويتم التحكم في زمن الإغلاق والفصل عن طريق التحكم في قيمة تيار القاعدة 'Base current' في حالة استخدام الترانزستورات كمفاتيح إلكترونية بينما يتم التحكم في قيمة هذه الأزمنة عن طريق التحكم في قيمة دورة التشغيل لنبضة البوابة في حالة استخدام الموسفت حيث عندما تكون جهد النبضة موجباً يكون الموسفت مغلقاً بينما لنبضة قيمتها صفرية يصبح الموسفت مفصول وعند استخدام الثايرستور في دوائر مقطعات التيار المستمر فلابد من استخدام دائرة مساعدة (Auxiliary Circuit) أخرى لإطفاء (لفصل) الثايرستور وتسمى دائرة الإطفاء 'Commutation circuit'. وسوف نفترض طوال دراستنا لمقطعات التيار المستمر بأن تكون المفاتيح الإلكترونية من نوعية الموسفت أو ترانزستور البوابة ثنائية القطبية والتي تتميز بأن فصل وغلق هذه المفاتيح يتم بطريقة ميسرة ولا تحتاج لدوائر مساعدة للإطفاء مثل دوائر مقطعات التيار المستمر والتي تستخدم الثايرستور ولكن لا يوجد حتى الآن البديل للثايرستور في حالات الأحمال التي لها قدرة عالية.

مبدأ عمل مقطع التيار المستمر الأساسي والمتصل بحمل مادي R

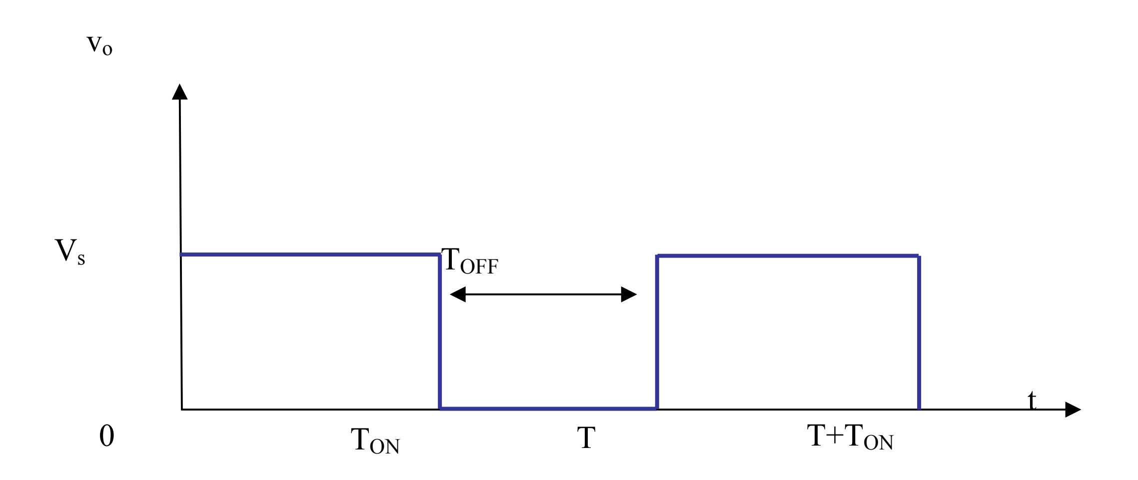
The Principle of Operation of a Basic DC Chopper Connected with a Resistive Load:

يمكن التحكم في قيمة جهد الخرج 'v_o' لمقطع التيار المستمر والمبين بالشكل (٣ -١) بحيث تقع قيمته في المدى من صفر إلى قيمة جهد المصدر الكهربي 'V_s' $(0 \le v_o \le V_s)$ ويتم التحكم عن طريق التحكم في زمن فتح وغلق المفتاح الإلكتروني 'S' أي يتم هذا التحكم عن طريق التحكم في دورة التشغيل. وتكون قيمة جهد الخرج 'v_o' لمقطع التيار المستمر له قيمة صفرية وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل لها قيمة صفرية بينما تكون قيمة جهد خرج المقطع 'v_o' له قيمة مساوية لقيمة جهد المصدر الكهربي 'V_s' وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل لها قيمة الوحدة والشكل (٣ -٣) يوضح شكل موجة جهد الخرج 'v_o'.

القيمة المتوسطة لجهد وتيار خرج مقطع التيار المستمر:

ويمكن إيجاد الصيغة الرياضية للقيمة المتوسطة لجهد الخرج 'V_o' كالتالي:

$$V_o = \frac{T_{ON}}{T_{ON}+T_{OFF}}.V_s = \frac{T_{ON}}{T}.V_s \qquad (٣ -٣)$$



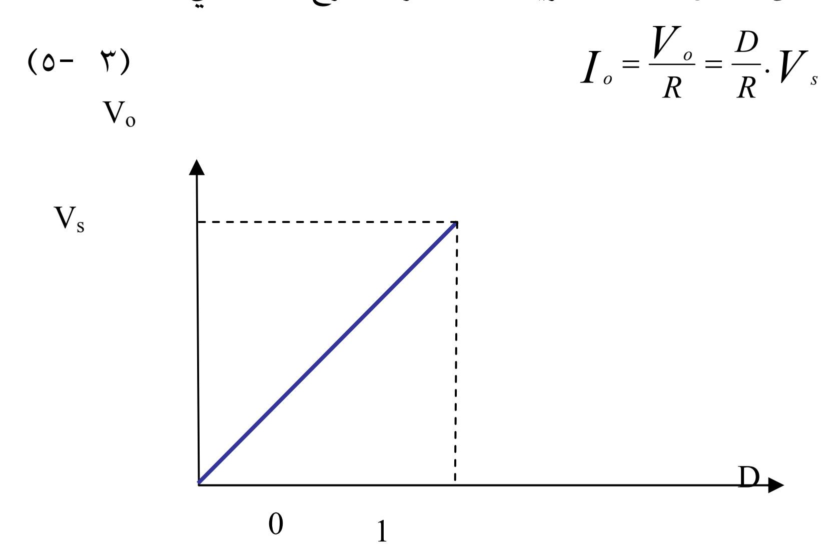
الشكل (٣ -٣): موجة جهد خرج 'v_o' مقطع التيار المستمر.

بالتعويض من المعادلة (٣ -٢) في المعادلة (٣ -٣) يمكن الحصول على المعادلة التالية للقيمة المتوسطة لجهد الخرج

$$V_o = D\,V_s \qquad (٣ -٤)$$

ونلاحظ من المعادلة (٣ -٤) أن العلاقة ما بين القيمة المتوسطة لجهد الخرج 'V_o' ودورة التشغيل 'D' عبارة عن علاقة خطية ويبين الشكل (٣ -٤) العلاقة بينهما حيث تتراوح قيمة V_o ما بين الصفر وقيمة جهد المصدر 'V_s' أي أن $0 \le V_0 \le V_s$. ويمكن أيضا استنباط المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج 'I_o' حيث شكل الموجة لتيار الخرج يكون مثل شكل الموجة المبينة بالشكل (٣ -٣) حيث إن القيمة المتوسطة لتيار الخرج 'I_o' عبارة عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج مقسوم على قيمة المقاومة المادية للحمل وبالتالي يمكن تمثيل المعادلة الرياضية لتيار الخرج كالتالي:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{D}{R} \cdot V_s \qquad (٣ -٥)$$



الشكل (٣ -٤): العلاقة بين القيمة المتوسطة لجهد الخرج 'V_o' ودورة التشغيل 'D'.

القيمة الفعالة لجهد و تيار خرج مقطع التيار المستمر:

ويمكن تمثيل المعادلات الرياضية لجهد الخرج الفعال '$V_{o(rms)}$' وتيار الخرج الفعال '$I_{o(rms)}$' كالتالي:

$$V_{o(rms)} = V_s \sqrt{D} \qquad (٣ -٦)$$

$$I_{o(rms)} = \frac{V_s}{R} \sqrt{D} = I_s \sqrt{D} \qquad (٣ -٧)$$

حيث أن: التيار I_s عبارة عن قيمة جهد المصدر الكهربي مقسوم على قيمة المقاومة المادية 'R'

قدرة مقطع التيار المستمر:

بافتراض أن مقطع التيار المستمر ليس له فقد أي أن المفاتيح الإلكترونية الخاصة بهذه المقطعات ليس بها فقد و تصبح قيمة القدرة الداخلة للمقطع 'P_i' هي نفسها قيمة قدرة الخرج 'P_o'. و يمكن أن نعبر عن قيمة القدرة الداخلة لمقطع التيار المستمر بالمعادلة الرياضية التالية:

$$P_i = D \frac{V_s^2}{R} \quad (٣ -٨)$$

طرق التقنية المختلفة لتغيير قيمة الجهد المتوسط لمقطعات التيار المستمر:

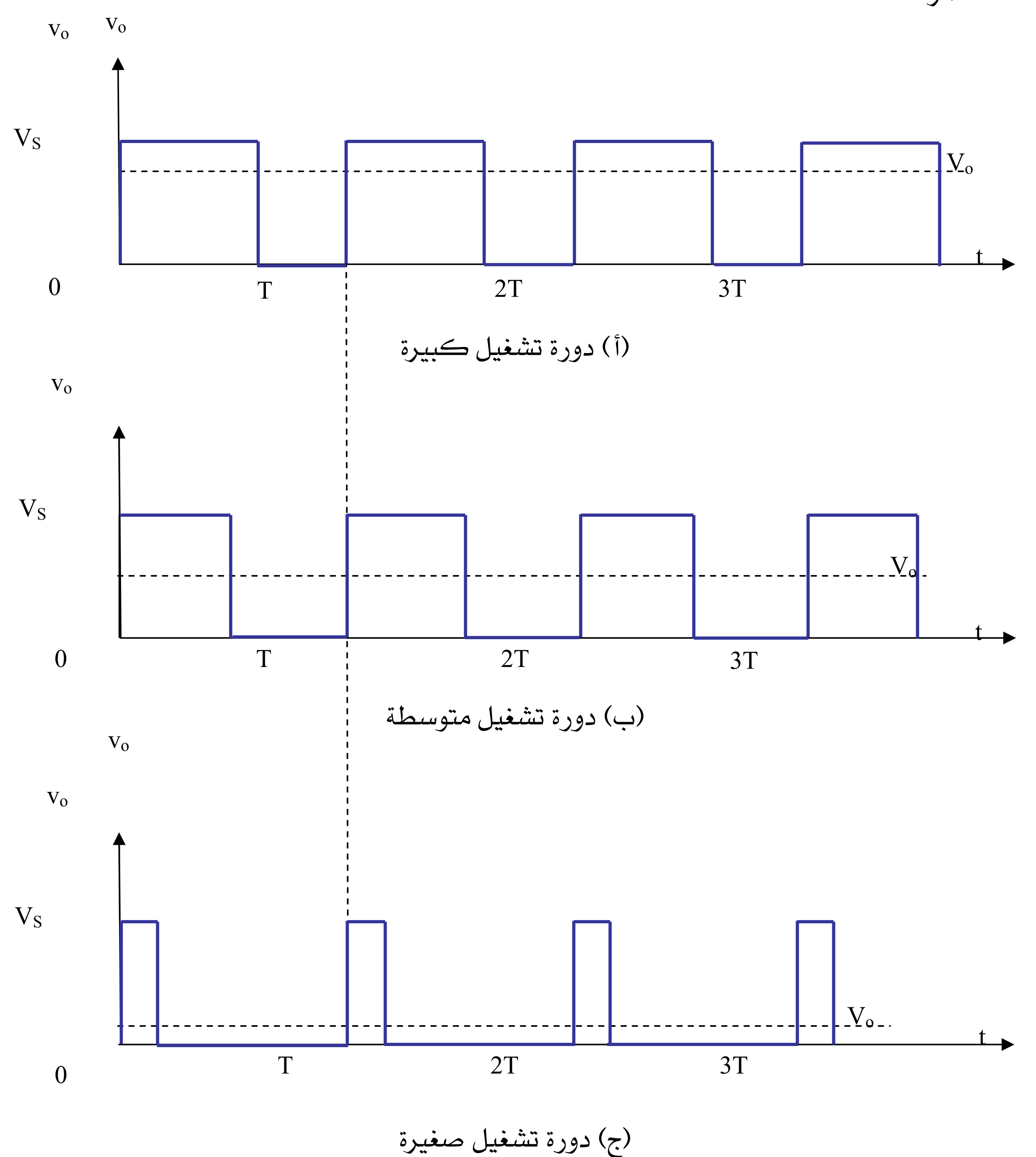
يمكن تغيير القيمة المتوسطة لجهد خرج مقطعات التيار المستمر عن طريق استخدام طرق التقنية التالية:

- طريقة تعديل عرض النبضة Pulse-Width Modulation (PWM).
- طريقة تعديل تردد النبضة Pulse-Frequency Modulation (PFM).

حيث يتم تغيير عرض النبض 'T_{ON}' في طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM' مع ثبات قيمة الزمن الدوري للفصل والغلق 'T' ويبين الشكل (٣ -٥) موجات جهد الخرج لقيم مختلفة وتصاعدية لدورة التشغيل بينما في طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM' يتم المحافظة على قيمة ثابتة لزمن إغلاق المفتاح 'T_{ON}' بينما يتم تغيير قيمة الزمن الدوري 'T' أي تغيير تردد الفصل والغلق للمفتاح الإلكتروني ويبين الشكل (٣ -٦) موجات جهد الخرج لقيم مختلفة وتصاعدية للزمن الدوري للفصل والغلق وفي هذه الحالة تقل القيمة المتوسطة لجهد الخرج بتقليل قيمة التردد. وتكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج لمقطعات التيار المستمر لها قيمة صفرية عندما تكون دورة التشغيل تساوي صفراً بينما تكون قيمة هذا الجهد مساوية لقيمة جهد المصدر الكهربي وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل قيمتها الوحدة وذلك سواء تم استخدام طريقة تعديل عرض النبضة "PWM' أو طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM'.

عندما يراد الحصول على قيمة متوسطة منخفضة لجهد الخرج باستخدام طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM' فلابد من تقليل قيمة تردد فصل وغلق المفتاح الإلكتروني 'S' الخاص بمقطع التيار المستمر وهذا يؤدي لتيار خرج له دالة غير متصلة وذلك في حالة وجود حمل حثي وهذا التيار يحتوي على تموجات عالية 'high current ripples' مما يؤدي إلى زيادة الفاقد بالحمل وتسخينه وعلى الجانب الآخر تزداد قيمة الفقد بالمفاتيح الإلكترونية نتيجة زيادة قيمة تردد الفصل والغلق لهذه المفاتيح.

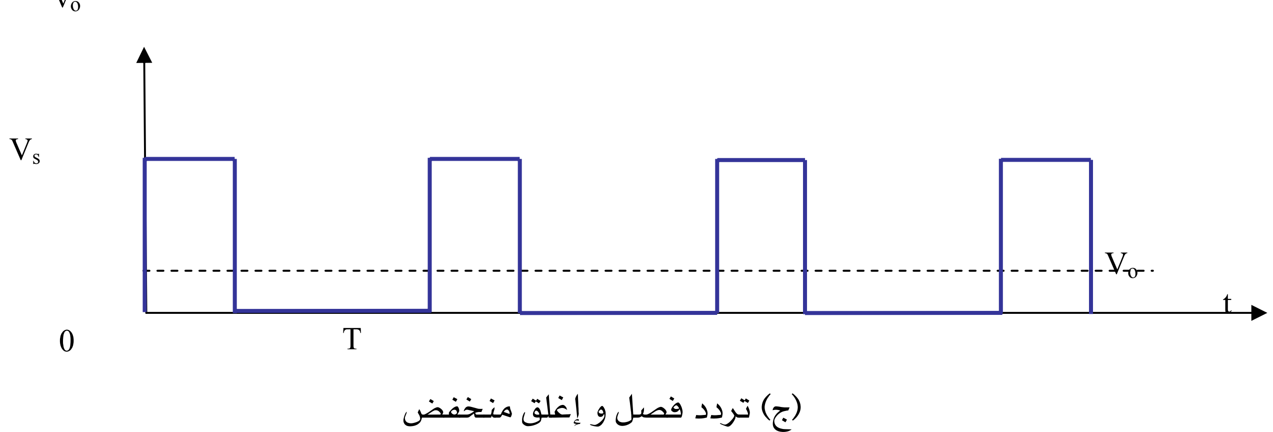
تتميز طريقة تعديل عرض النبضة "PWM" بأن التموجات الموجودة في موجة تيار خرج مقطع التيار المستمر تكون قليلة وهذا يؤدي إلى استخدام مرشحات 'filters' صغيرة الحجم و بالتالي إلى تقليل تكلفة هذه المرشحات.



الشكل (٣ -٥): موجات جهد الخرج 'v_o' عند قيمة ثابتة لتردد الفصل والغلق.

v_o
V_s
V_o
t
0
T

(أ) تردد فصل و إغلق عالي



(ب) تردد فصل و إغلق متوسط

v_o
V_s
V_o
t
0
T

(ج) تردد فصل و إغلق منخفض

الشكل (٣ -٦): موجات جهد الخرج 'vo' لقيم مختلفة لترددات الفصل والغلق

مثال ٣ -١:

يتغذى مقطع التيار المستمر المبين بالشكل (٣ -١) من مصدر كهربي مستمر قيمة جهده 220 V و يتصل هذا المقطع بحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح الإلكتروني 'S' 1 KHz و قيمة دورة التشغيل تساوي 0.5 فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج 'V_o'.
- القيمة الفعالة لجهد الخرج '$V_{o(rms)}$'.
- القدرة المسحوبة من المصدر الكهربي 'P_i'.

الحل:

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لجهد الخرج عن طريق استخدام المعادلة (٣ -٤) كالآتي:

$$V_o = D\,V_s = 0.5(220) = 110\ \text{V}$$

- يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد الخرج عن طريق استخدام المعادلة (٣ -٦) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s\sqrt{D} = 220\sqrt{0.5} = 155.6\ \text{V}$$

- يمكن تعيين قيمة القدرة المسحوبة من المصدر الكهربي عن طريق استخدم المعادلة (٣ -٨) كالآتي:

$$P_i = D\,\frac{V_s^2}{R} = 0.5\,\frac{220^2}{10} = 2420\ \text{W}$$

مقطعات التيار المستمر الخافضة Step-Down (Buck) DC Choppers:

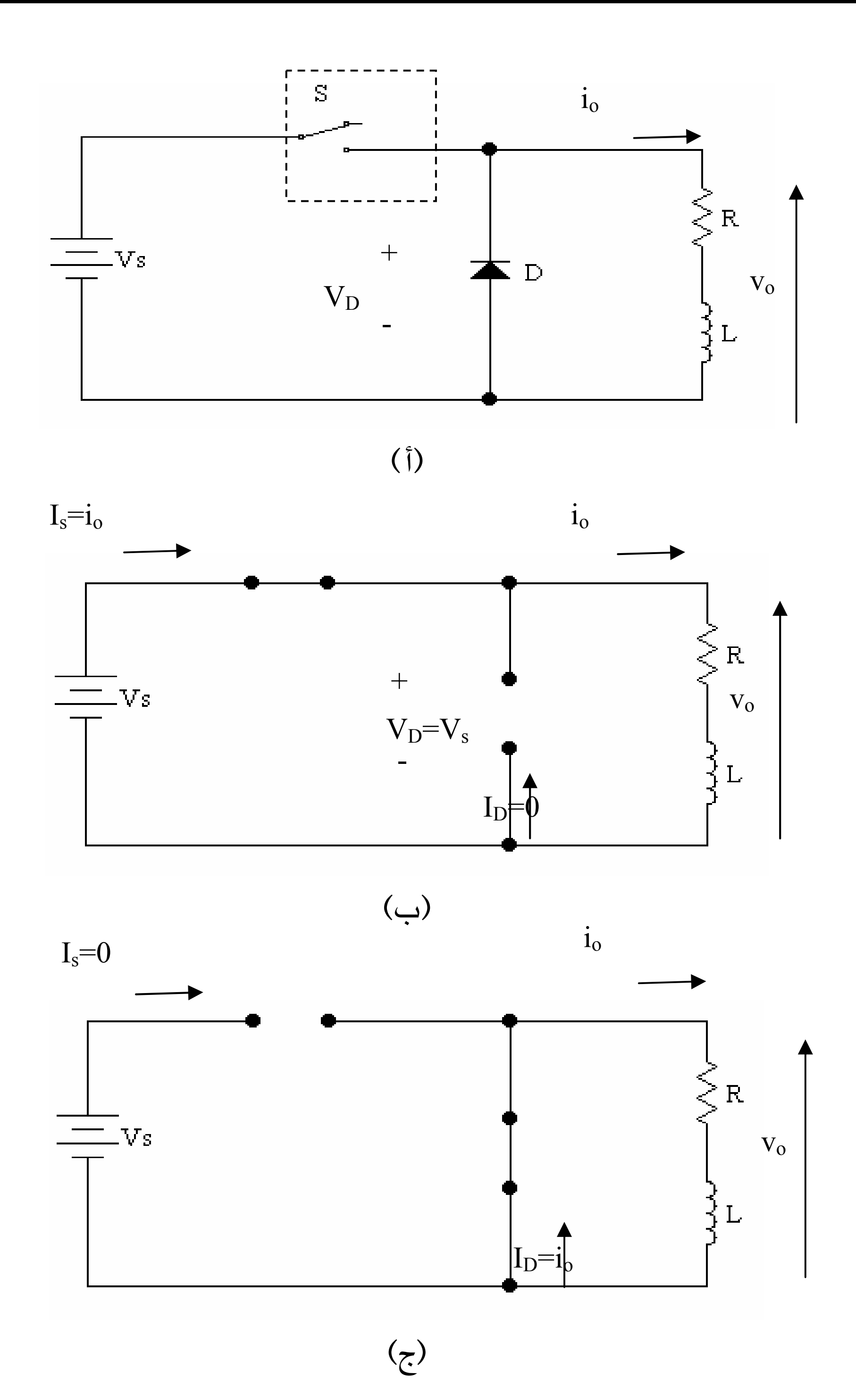
حالة الحمل الحثي Case of An Inductive Load:

نلاحظ من دراستنا السابقة لمقطعات التيار المستمرة المحملة بأحمال مادية بأن موجة تيار الخرج لها عبارة عن موجة غير ناعمة حيث لها تموجان عالية. ولهذا السبب هذه النوعية من المقطعات لا تستخدم في الحياة العملية حيث تكون ملائمة فقط للأحمال المادية. وحيث تكون معظم الأحمال المستخدمة في الحياة العملية عبارة عن أحمال حثية فدائما تتصل هذه الأحمال بدايودات حذافة بهدف الحصول على موجة ناعمة وخالية من التموجات. ويبين الشكل (٣ -٧) حالة مقطع مستمر متصل بحمل حثي و دايود حذافة حيث تكون وظيفة الدايود الحذافة المحافظة على استمرارية التيار بالحمل الحثي بجانب حماية المفتاح الإلكتروني 'S' من معدل زيادة الجهد بالنسبة للزمن 'dv/dt' والدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (أ) تمثل دائرة لمقطع تيار مستمر منخفض وتستخدم هذه الدائرة كمقطع تيار مستمر لبعض الأحمال

العملية كمحركات التيار المستمر حيث تكون موجة التيار لهذه الأحمال عبارة عن موجة خالية من التموجات وناعمة.

مبدأ عمل مقطعات التيار المستمر:

كما سبق ذكره في الفقرة السابقة فإن المفتاح الإلكتروني S يتم التحكم فيه عن طريق التحكم في قيمة دورة التشغيل أو في قيمة أزمنة فصل وغلق المفتاح للنبضة المبينة بالشكل (٣ -٢) حيث يتم إغلق المفتاح 'S' عند إعطاء نبضة مرتفعة ويتم فصله عند إعطاء نبضة منخفضة. وعند إغلق المفتاح S بالدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (أ) بإعطاء نبضة بقيمة عالية للمفتاح فإن الدايود الحذافة D سوف يكون في حالة انحياز خلفي وبالتالي سوف يمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الكهربي المستمر 'V_s' والمفتاح S والحمل الحثي 'R-L' ويبقي الدايود الحذافة مفصول و في وضع انحياز خلفي طوال فترة إغلق المفتاح و يبدأ التيار بقيمة صفرية في بداية الدورة الأولى لتشغيل الدائرة وتزداد قيمة التيار تدريجيا بطريقة أسية طوال فترة إغلق المفتاح '$0 \le t \le T_{ON}$' وتكون قيمة جهد الحمل 'v_o' هو نفسه قيمة جهد المصدر الكهربي خلال هذه الفترة و الشكل (٣ -٧) (ب) يبين الدائرة المكافئة لهذه الحالة. ويتم فصل وقطع التيار عن المفتاح S بإعطاء نبضة منخفضة للمفتاح وذلك عند اللحظة الزمنية $t = T_{ON}$ وعند هذه اللحظة سيتم مرور تيار الحمل من الدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (ب) للدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايود الحذافة والمبينة بالشكل (٣ -٧) (ج) خلال الفترة الزمنية لفصل المفتاح '$0 \le t \le T_{OFF}$' ويمر التيار في هذه الدائرة برغم أن قيمة جهد خرج الحمل له قيمة صفرية طوال هذه الفترة الزمنية نتيجة لوجود طاقة مغناطيسية بالملف والناتجة من مرور التيار بالحمل طوال الفترة السابقة والتي فيها المفتاح مغلق. و يبدأ مرور التيار في الدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (ج) بنفس القيمة التي وصل إليها التيار في نهاية المرحلة الأولى للدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (ب) وذلك عند اللحظة الزمنية ثم تبدأ قيمة التيار في التناقص بطريقة أسية ومحاولا الوصول لقيمة صفرية طوال فترة فصل المفتاح '$0 \le t \le T_{OFF}$' ويكون المفتاح في وضع الانحياز الخلفي طوال هذه الفترة الزمنية. نلاحظ أن الهدف من وجود الدايود الحذافة هو محاولة وجود مسار لتيار الحمل الحثي عند فصل المفتاح بجانب العمل على حماية المفتاح من معدل زيادة الجهد بالنسبة للزمن 'dv/dt'.



الشكل (٣ -٧): مقطع تيار مستمر متصل بحمل حثي ودوائره المكافئة في حالتي الفصل والغلق.

سوف ندرس في الفقرات التالية حالتي اتصال وعدم اتصال تيار الحمل أي حالتي تيار الحمل المستمر وغير المستمر وسوف تتم الدراسة على أساس بعض الافتراضات الصحيحة والتي تجعل التحليل الرياضي وكتابة المعادلات لهذه الحالات تكون بصورة أبسط مع ملاحظة أن الحل الحقيقي والحل التقريبي سوف يعطيان نفس النتائج تقريبا ونسبة الخطأ بينهما يمكن التجاوز عنها وبالتالي سوف نكتفي بالمعادلات التقريبية في الفقرات التالية.

صيغة التيار المتصل Continuous Current Mode:

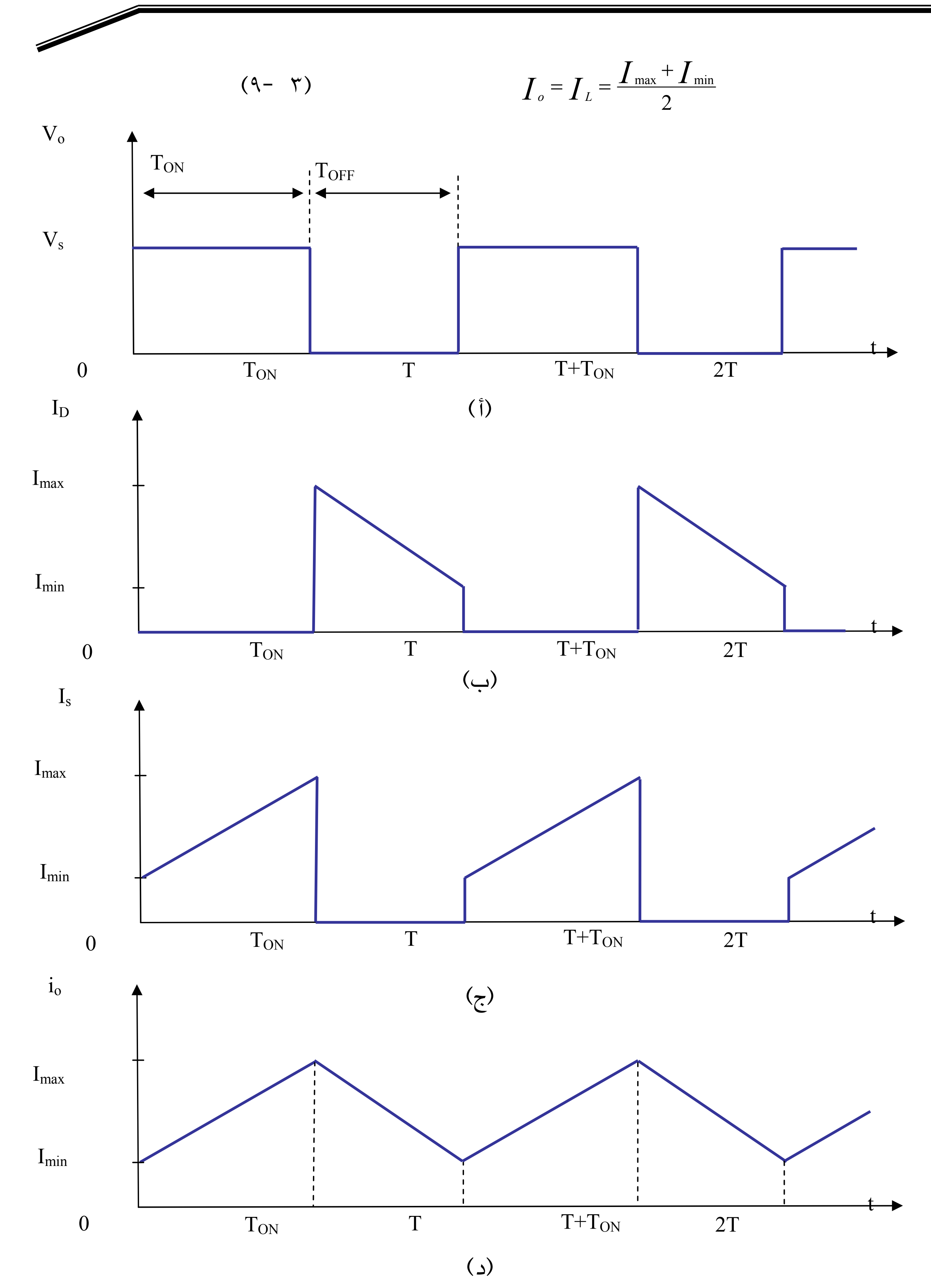
عادة ما تكون موجة تيار الحمل للدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) (أ) أما موجة مستمرة أي عبارة عن دالة متصلة أو موجة غير مستمرة أي عبارة عن دالة غير متصلة وهذا يعتمد علي عدة عوامل وأهمها كالتالي:

- قيمة ممانعة الملف الحثية بالنسبة لمقاومته المادية.
- قيمة دورة التشغيل.
- قيم تردد فصل وغلق المفتاح 'S'.

ودائما يكون الهدف المطلوب هو استمرارية موجة تيار الحمل بحيث تكون هذه الموجة ناعمة وخالية من أي تموجات. ولضمان استمرارية التيار غالبا ما يتم استخدام مرشح 'filter' بسيط يتكون من ملف حثي 'L' وكلما ازدادت قيمة هذا الملف الحثي أمكن الحصول على موجة لتيار الحمل ناعمة وخالية من أي تموجات وذلك عندما يعمل المفتاح بترددات فصل وغلق قليلة نسبيا بينما تكون قيمة هذا الملف الحثي الخاص بالمرشح له قيمة قليلة وذلك عند فصل وغلق المفتاح بترددات عالية إلى حد ما.

سوف نقوم في هذه الفقرة بدراسة تيار الحمل المستمر أي حالة تيار الحمل المتواصل والذي سوف يكون له موجة ناعمة وخالية تقريبا من التموجات أي لها بعض التموجات القليلة و سوف يبني هذا الفرض على أساس أن الملف الحثي له ثابت زمني 'τ' أكبر بكثير من الزمن الدوري للنبضة أي أن $L/R >> \tau$ وبناء على هذا الفرض فإن تيار الحمل سوف يكون تقريبا على هيئة شكل خط مستقيم يتذبذب من قيمة صغرى I_{min} إلى قيمة عظمى I_{max} ثم إلى قيمة صغرى مرة أخرى وتتكرر شكل موجة هذا التيار كل دورة زمنية زمنها الدوري T. ويبين الشكل (٣ -٨) شكل الموجات للدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) لحالة تيار الحمل المتواصل ويبين الشكل (٣ -٨) (أ) موجة جهد الحمل ونلاحظ أن قيمتها تساوى قيمة جهد المصدر Vs طوال فترة إغلق المفتاح S '$0 \le t \le TON$' وأن قيمتها تكون صفرية طوال فترة فصل المفتاح '$TON \le t \le T$' وعمل الدايود الحذافة وشكل ٣ -٨ (ب) يبين شكل موجة تيار الدايود الحذافة وشكل ٣ -٨ (ج) يبين شكل موجة تيار المصدر 'i_s' والمار بالمفتاح S وشكل ٣ -٨ (ب) يبين شكل موجة تيار الحمل وبمقارنة الموجات بالأشكال ٣ -٨ (ب)،٣ -٨ (ج)،٣ -٨ (د) نلاحظ أن موجة تيار الدايود الحذافة هي موجة تيار الحمل خلال الفترة الزمنية '$TON \le t \le T$' بينما موجة تيار المصدر الكهربي 'i_s' هي موجة تيار الحمل خلال الفترة الزمنية '$0 \le t \le TON$' وقد سبق تفسير هذا في الفقرة السابقة ويكون تيار الحمل له قيمة متوسطة كالتالي:

$$I_o = I_L = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \qquad (٣ -٩)$$



الشكل (٣ -٨): موجات دائرة مقطع تيار مستمر متصل بحمل حثي وتيار الحمل متصل.

وأيضا يمكن أيجاد تيار الحمل المتوسط عن طريق معرفة جهد الحمل المتوسط كالتالي:

$$I_o = \frac{V_o}{R} \qquad (٣ -١٠)$$

ومن المعادلة (٣ -٩)، (٣ -١٠) يمكن استنتاج المعادلة التالية:

$$I_{max} + I_{min} = 2\frac{V_o}{R} \qquad (٣ -١١)$$

ويمكن إيجاد قيم I_{min} و I_{max} بإيجاد معادلة أخرى تحتوى على هذين المتغيرين. ويتم ذلك بإيجاد معادلة الجهد على الملف الحثي الذي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية فتكون معادلة الجهد للملف كالتالي:

$$V_L = L\,\frac{di_o}{dt} = V_o \qquad (٣ -١٢)$$

أو

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{V_O}{L} = \frac{\Delta i_o}{\Delta t}$$

$$\therefore \Delta i_O = \frac{V_O}{L}\Delta t \qquad (٣ -١٣)$$

حيث أن Δi_O هي القيمة القصوى لتموجات تيار الحمل وبالتالي تكون:

$$\Delta i_O = I_{max} - I_{min} \qquad (٣ -١٤)$$

وتتحقق المعادلة السابقة خلال فترة فصل المفتاح وبالتالي تكون قيمة Δt كالتالي:

$$\Delta t = T_{OFF} \qquad (٣ -١٥)$$

ومن المعادلتين (٣١٤)، (٣ -١٥) وبالتعويض في المعادلة (٣ -١٣) يمكن استنتاج المعادلة التالية:

$$I_{max} - I_{min} = \frac{V_o}{L}T_{OFF} \qquad (٣ -١٦)$$

وبحل المعادلتين (٣ -١٦) و (٣ -١١) يمكن إيجاد قيمة كل من I_{min} ، I_{max}

$$I_{max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L}T_{OFF} \qquad (٣ -١٧)$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L}T_{OFF} \qquad (٣ -١٨)$$

وتصبح القيمة العظمى لتموجات تيار الحمل $I_{P-P} = \Delta i_O$ كالتالي:

$$I_{P-P} = I_{max} - I_{min} \qquad (٣ -١٩)$$

$$I_{P-P} = T_{OFF}\frac{V_0}{L} \qquad (٣ -٢٠)$$

ولإيجاد القيمة المتوسطة لتيار المفتاح S أو المصدر الكهربي 'I_s' و تيار الدايود الحذافة 'I_D' فيمكن إيجادهما عن طريق دورة التشغيل 'D' كالتالي:

$$I_s = D I_o = \frac{T_{ON}}{T} I_o \qquad (٣ - ٢١)$$

$$I_D = (1-D) I_o = \frac{T_{OFF}}{T} I_o \qquad (٣ - ٢٢)$$

حيث أن I_o هي القيمة المتوسطة لتيار الحمل و I_D هي القيمة المتوسطة لتيار الدايود الحدافه. وحيث أن موجة تيار المصدر الكهربي i_s عبارة عن موجة تيار غير متواصل وهى عبارة عن نبضات تتكرر كل زمن دوري T ولتحسين شكل هذه الموجة يمكن وضع مرشح يتكون من مكثف على التوازي مع المصدر الكهربي V_s وهذا المرشح سوف يعمل على استمرارية تيار المصدر الكهربي.

صيغة التيار غير المتصل Discontinuous Current Mode:

نعلم أن تيار حمل مقطع التيار المستمر دالة في دورة التشغيل 'D' وعند توصيل هذا المقطع بحمل حثي له ممانعة حثية قليلة فتيار الحمل سوف يتذبذب ما بين قيمتي صغرى وعظمى تبعًا لفصل وغلق المفتاح الإلكتروني 'S'. فعند إغلق المفتاح 'S' تتزايد قيمة تيار الحمل تدريجيًا بطريقة اسية طوال فترة إغلق المفتاح حيث يبدأ هذا التيار بقيمة صغرى ثم يزداد هذا التيار حتى يصل إلى قيمته العظمى عند نهاية فترة إغلق المفتاح. وعند فصل المفتاح S فسوف تتناقص تدريجيا قيمة تيار الحمل أيضا بطريقة اسية حيث يبدأ التيار من قيمة عظمى ثم يبدأ التيار في التناقص حتى يصل إلى قيمته الصغرى ويمكن أن تصل قيمة تيار الحمل الصغرى إلى قيمة صفرية كلما تم تقليل قيمة دورة التشغيل ويقال في هذه الحالة بأن تيار حمل المقطع غير متواصل. يمكن أن تصل قيمة تيار الحمل الصفرية عند أي لحظة زمنية خلال لحظة فصل المفتاح أي خلال الفترة الزمنية $T_{ON} \le t \le T$.

يبين الشكل (٣ -٩) موجات الدائرة المبينة بالشكل (٣ -٧) لحالة تيار الحمل غير المتصل حيث يبين الشكل (٣ -٩) موجة جهد الخرج و موجات كل من تيارات الدايود الحذافة و المصدر الكهربي والحمل على فرض أن الثابت الزمني للملف'τ' له قيمة مساوية تقريبا لقيمة زمن إغلق المفتاح S أي الزمن T_{ON}. نلاحظ من الشكل (٣ -٩) موجة تيار الدايود الحذافة هي موجة تيار الحمل خلال فترة فصل المفتاح S أي خلال الفترة الزمنية $T_{ON} \le t \le T$ وموجة تيار المصدر الكهربي هي موجة تيار الحمل خلال فترة إغلق المفتاح S أي خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T_{ON}$.

ويفضل كما تم ذكره سابقا بأن يكون تيار الحمل متصل ولتجنب حالة تيار حمل غير متصل فيمكن تحقيق ذلك عن طريق اختيار قيم مناسبة لتردد لفصل وغلق المفتاح أو عن طريق اختيار قيم

مناسبة لقيمة الملف الحثية 'L'. ويمكن تحقيق استمرارية تيار الحمل عن طريق إيجاد اقل قيمة للملف الحثي بحيث لأي قيمة حثية تتجاوز هذه القيمة فسوف يكون تيار الحمل متصل. ويمكن الحصول على اقل قيمة للملف الحثي عن طريق وضع قيمة صفرية لتيار الحمل الأصغر 'I_{min}' بالمعادلة (٣ -١٨) وبالتالي:

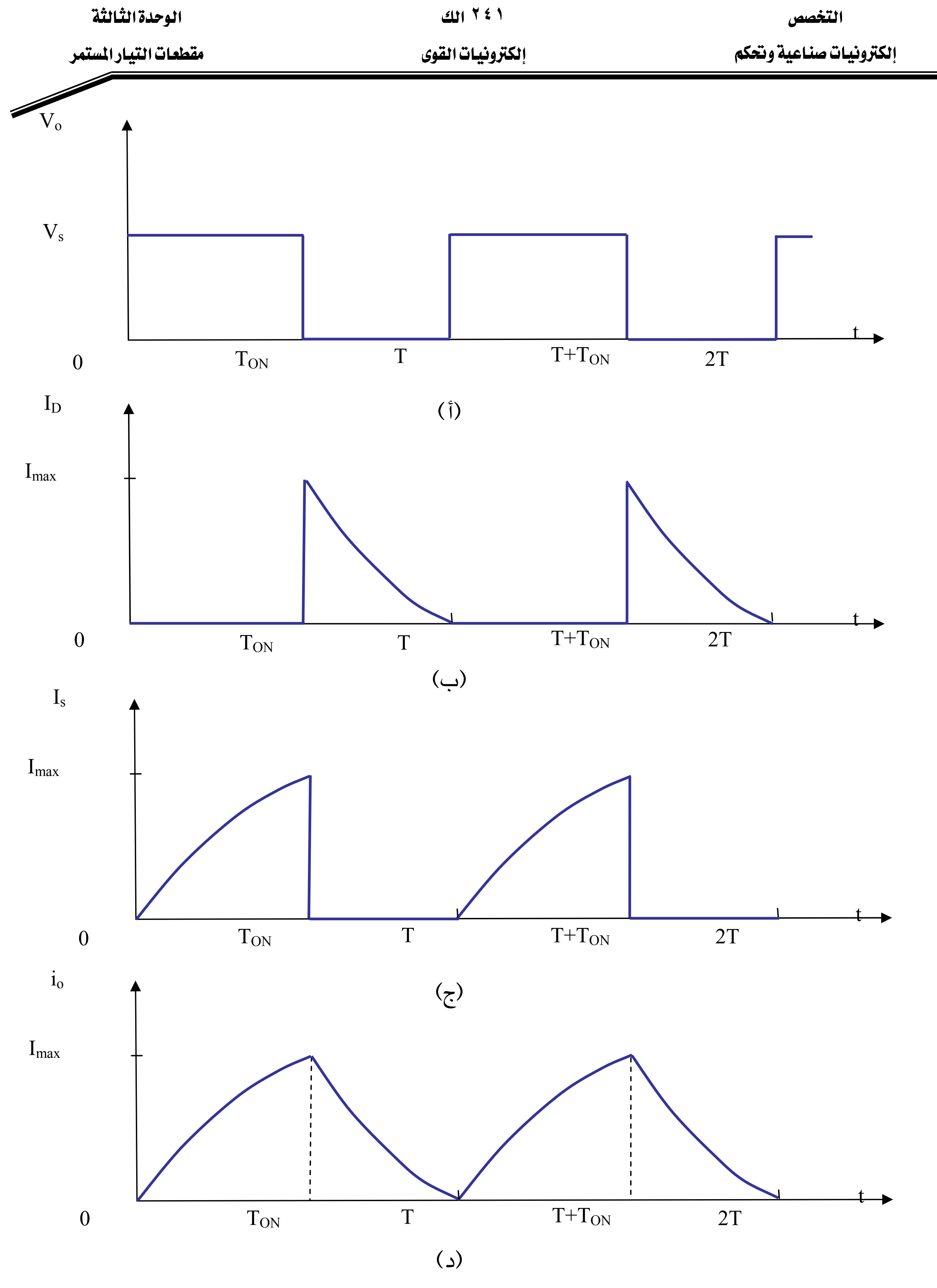
$$I_{\min} = 0 = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L} T_{OFF}$$

$$\therefore \frac{V_o}{R} = T_{OFF} \frac{V_o}{2L}$$

أو

$$L = R\frac{T_{OFF}}{2} \qquad (٢ \ -٢٣)$$

نلاحظ أن يمكن الحصول على موجة تيار حمل خالي من أي تموجات عن طريقة استعمال قيمة كبيرة جدًا للملف الحثي ونظريا تكون هذه القيمة لانهائية.



الشكل (٣ -٩): موجات دائرة مقطع تيار مستمر متصل بحمل حثي وتيار الحمل غير متصل.

مثال ٣ -٢:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣ -٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده 100 V ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية 10 Ω و تكون القيمة الحثية للملف مساوية 50 mH. إذا علمت أن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي 1 KHz وقيمة جهد الخرج (الحمل) تساوى 50 V فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.
- قيمة زمن إغلق المفتاح 'T_{ON}'.
- قيمة جهد الحمل الفعال '$V_{o(rms)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_o'.
- القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}'.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}'.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}' وذلك في حالة زيادة قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح لتصبح 5 KHz.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}' وذلك في حالة زيادة قيمة الملف الحثية لتصبح 250 mH.

الحل:

- يمكن حساب قيمة دورة التشغيل باستخدام المعادلة (٣ -٤) كالآتي:

$$\because V_o = D\,V_s$$

$$\therefore D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{50}{100} = 0.5$$

- يتم حساب زمن إغلق المفتاح خلال الدورة الواحدة 'T_{ON}' باستخدام المعادلة (٣ -٢) كالتالي:

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \qquad \therefore T_{ON} = D\,T = \frac{D}{f}$$

$$\therefore T_{ON} = \frac{0.5}{1000} = 0.5 \text{ ms}$$

- يمكن أيضا حساب زمن فصل المفتاح خلال الدورة الواحدة 'T_{OFF}' كالآتي:

$$T_{OFF} = T - T_{ON} = 1 - 0.5 = 0.5 \text{ ms}$$

- يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد الحمل باستخدام المعادلة (٣ -٦) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s\sqrt{D} = 100\sqrt{0.5} = 70.7 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{50}{100} = 0.5 \quad A$$

- يمكن حساب القيمة العظمي والقيمة الصغرى باستخدام المعادلتين (٣ -١٧) و (٣ -١٨) كالآتي:

$$I_{max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*50} 0.5 = 5.25 \quad A$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*50} 0.5 = 4.75 \quad A$$

- يمكن حساب قيمة I_{P-P} كالآتي:

$$I_{P-P} = I_{max} - I_{min} = 5.25 - 4.75 = 0.5 \quad A$$

- لإيجاد قيمة I_{P-P} والمناظرة لتردد فصل وغلق المفتاح والذي قيمته 5 KHz وعند دورة تشغيل 0.5 فلابد من إيجاد قيمه زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = (1-D)T = \frac{(1-D)}{f}$$

$$\therefore T_{OFF} = \frac{(1-0.5)}{5*10^3} = 0.1 \text{ ms}$$

$$\therefore I_{max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*50} 0.1 = 5.05 \quad A$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*50} 0.1 = 4.95 \quad A$$

$$\therefore I_{P-P} = I_{max} - I_{min} = 5.05 - 4.95 = 0.1 \quad A$$

نلاحظ من نتائج هذا الجزء أن قيمة I_{P-P} قد تناقصت نتيجة لزيادة قيمة تردد فصل وغلق المفتاح وبالتالي قد حدث تحسين للشكل الموجي والخاص بموجة الحمل.

- لإيجاد قيمة I_{P-P} والمناظرة لقيمه حثية 250 mH و تردد فصل وغلق المفتاح قيمته 1 KHz ودورة تشغيل 0.5 فلابد من إيجاد قيمه زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = (1-D)T = \frac{(1-D)}{f}$$

$$\therefore T_{OFF} = \frac{(1-0.5)}{5*10^3} = 0.1 \text{ ms}$$

$$\therefore I_{max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*250} 0.5 = 5.05 \quad A$$

$$I_{min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*250} 0.5 = 4.95 \quad A$$

$$\therefore I_{P-P} = I_{max} - I_{min} = 5.05 - 4.95 = 0.1 \quad A$$

نلاحظ أيضا من نتائج هذا الجزء أن قيمة I_{P-P} قد تناقصت نتيجة لزيادة القيمة الحثية للملف وبالتالي قد حدث تحسين للشكل الموجي والخاص بموجة الحمل. وبمقارنة النتائج التي قد تم الحصول عليها نجد أن نفس قيمة I_{P-P} قد تم الحصول عليها حيث إن نسبة رفع تردد الفصل والغلق هي نفس نسبة رفع قيمة الملف الحثي.

مثال ٣ -٣:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣ -٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده 100 V ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية $10\ \Omega$ و قيمته الحثية 100 mH. إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي 1 KHz وقيمة زمن إغلق المفتاح الإلكتروني 'T_{ON}' تساوي 0.5 ms فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.
- قيمة زمن فصل المفتاح 'T_{OFF}'.
- القيمة المتوسطة لجهد الحمل 'V_o'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_o'.
- القيمة الفعالة لجهد الحمل '$V_{o(rms)}$'.
- اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل.

الحل:

- يمكن تعيين دورة التشغيل كالآتي:

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{1*10^3}=1 \quad ms$$

$$D=\frac{T_{ON}}{T}=\frac{0.5}{1}=0.5 \quad ms$$

- تعين قيمة زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF}=T-T_{ON}=1-0.5=0.5 \quad ms$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لجهد الحمل كالآتي:

$$V_o=DV_s=0.5*100=50 \quad V$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار الحمل كالآتي:

$$I_o=\frac{V_o}{R}=\frac{50}{10}=5 \quad A$$

- يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد الحمل كالآتي:

$$V_{o(rms)}=V_s\sqrt{D}=100\sqrt{0.5}=70.7 \quad V$$

- يمكن تعيين قيمة اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل كالآتي:

$$L=\frac{T_{OFF}}{2}R=\frac{0.5}{2}*10=2.5 \quad ms$$

مثال ٣ -٤:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣ -٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده 200 V ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية 4 Ω و قيمته الحثية 500 mH. إذا علمت بأن القيمة المتوسطة لتيار الحمل 20 A وقيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}' 4 A وان هذا المقطع يعمل عند تردد فصل قيمته 100 Hz وقيمة زمن إغلق المفتاح الإلكتروني 'T_{ON}' تساوي 4 ms فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.
- قيمة زمن فصل المفتاح 'T_{OFF}'.
- القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربي 'I_s'.
- القيمة المتوسطة لتيار الدايود الحذافة 'I_D'.
- القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}'.

الحل:

- يمكن تعيين دورة التشغيل كالآتي:

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{100}=10 \quad ms$$

$$D=\frac{T_{ON}}{T}=\frac{4}{10}=0.4 \quad ms$$

- تعين قيمة زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF}=T-T_{ON}=10-4=6 \quad ms$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربي كالآتي:

$$I_s=D\,I_o=0.4*20=8 \quad A$$

- يمكن نعيين قيمه تيار الدايود الحذافة كالآتي:

$$I_D=(1-D)\,I_0=(1-0.6)*20=12 \quad A$$

- يمكن تعيين القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}' كالآتي:

$$I_{max}=I_o+\frac{I_{p-p}}{2}=20+\frac{4}{2}=22 \quad A$$

$$I_{max}=I_o-\frac{I_{p-p}}{2}=20-\frac{4}{2}=18 \quad A$$

قد تم حل هذا المثال على اعتبار أن موجة تيار الحمل تأخذ شكلاً خطياً حيث إن الثابت الزمني 'τ' للملف أكبر بكثير من الزمن الدوري لفصل وغلق المفتاح الإلكتروني 'T' علما بأن

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{500}{4}=125 \quad ms \quad and \quad T=10 \ ms$$

مثال ٣ -٥:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣ -٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده 25V ويتصل هذا المقطع بحمل مادي قيمة مقاومته 5 Ω. إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي 4 KHz وجهد الحمل المتوسط قيمته 15 V فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_o'.
- اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل.
- القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}'.

الحل:

- يمكن تعيين قيمه دورة التشغيل كالآتي:

$$D=\frac{V_o}{V_s}=\frac{15}{25}=0.6$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار الحمل كالآتي:

$$I_o=\frac{V_o}{R}=\frac{15}{5}=3 \quad A$$

- يمكن تعيين اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصلاً كالآتي:

$$T_{OFF}=(1-D)T=\frac{(1-D)}{f}=\frac{(1-0.6)}{4}=0.1 \quad ms$$

$$L=\frac{T_{OFF}}{2}R=\frac{0.1}{2}*5=0.25 \quad mH$$

- يمكن تعيين القيمة الصغرى والعظمى لتيار الحمل كالآتي:

$$I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L}T_{OFF} = \frac{15}{5} + \frac{15}{2*0.25}*0.1 = 3+3=6 \quad A$$

$$I_{\min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2L}T_{OFF} = 3-3=0$$

نلاحظ أن القيمة الصغرى لتيار الحمل تساوى صفراً وهذه النتيجة متوقعة حيث تيار الحمل سوف يكون متواصلاً أي متصلاً عند أي قيمة حثية أكبر من التي قد تم الحصول عليها.

أسئلة و تمارين:

٣ -١ عرف ما المقصود بدورة التشغيل 'D'

٣ -٢ ماذا يعنى المصطلح المعروف بمقطع التيار المستمر؟

٣ -٣ ما هي التطبيقات العملية لمقطع التيار المستمر.

٣ -٤ اشرح مبدأ العمل الرئيسي لمقطع التيار المستمر والخافض للجهد.

٣ -٥ ما هي العوامل الرئيسية التي تجعل تيار خرج مقطع التيار المستمر متواصل.

٣ -٦ اشرح مبدأ عمل مقطع التيار المستمر والمتصل بحمل حثي في حالة :

أ - شكل موجي لتيار حمل متواصل

ب - شكل موجي لتيار حمل غير متواصل (متقطع).

٣ -٧ ما هو تأثير زيادة تردد إغلق وفصل المفتاح الإلكتروني لمقطع التيار المستمر على شكل موجة تيار الخرج.

٣ -٨ يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته 110V وحمل مادي مقاومته 20Ω. إذا علمت بأن هذا المقطع يعمل بتردد قيمته 1KHz ودورة تشغيل 0.4 فأوجد:

أ - القيمة المتوسطة لجهد الخرج.

ب - القيمة الفعالة لتيار الخرج.

ج - القيمة الفعالة لجهد الخرج.

د - القيمة العظمى لتيار الخرج.

ه - القدرة المغذاة للحمل.

٣ -٩ يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته 100V وحمل مادي قيمته 5Ω وقيمة جهده 50V. أوجد:

أ - قيمة دورة التشغيل.

ب - القيمة المتوسطة والفعالة لتيار الدخل (المصدر).

٣ -١٠ يعمل مقطع جهد مستمر خافض للجهد عند تردد قيمته 1KHz ويتصل هذا المقطع بمصدر جهد مستمر قيمته 110 V و قيمة جهد الخرج المتوسط 75 V. أوجد قيمة أزمنة إغلق وفصل المفتاح الإلكتروني للمقطع خلال دورة كاملة (T_{ON},T_{OFF}).

٣ -١١ يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته 110V وحمل حثي مقاومته المادية 8Ω وقيمته الحثية 4mH. إذا علمت بأن هذا المقطع يعمل بتردد قيمته 1KHz ودورة تشغيل 0.4 وأنه يعمل بحيث يجعل تيار الحمل متواصل، فأوجد:

أ - القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل.

ب - القيمة الفعالة لجهد الخرج.

ج - القيمة العظمى والصغرى لتيار الخرج.

د - القيمة العظمى للقيمة العظمى للتيار التموجي .

ه - القيمة العظمى للقيمة العظمى عندما يزداد تردد المقطع إلى 5KHz.

و - أقل قيمة حثية للملف تجعل تيار الحمل متواصل.



إلكترونيات القوى

العواكس

العواكس

٤

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة_لابد أن يكون الطالب ملما وقادرا على تفسير التالي:

- المقصود بالعاكس
- تطبيقات العاكس العملية
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لعاكس مصدر الجهد
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لعاكس مصدر التيار
- مبدأ عمل العاكس القنطري والعاكس نصف القنطري للعواكس مصدر الجهد
- تفسير طرق التقنية المختلفة لعاكس الجهد
- وصف مبدأ عمل تعد يل عرض النبضة
- وصف مبدأ عمل تعد يل عرض النبضة الجيبي

مقدمة:

قد تم دراسة بعض دوائر الموحدات المحكومة أحادية الطور في الفصل الثاني و وظيفة هذه الموحدات هي تحويل الجهد الجيبي المتناوب ذات القيمة الفعالة الثابتة إلى جهد مستمر متغير القيمة ويتم التحكم في قيمته عن طريق التحكم في زاوية إشعال الثايرستور.وقد تم دراسة مقطعات التيار المستمر في الفصل الثالث ووظيفة هذه المقطعات هي الحصول على جهد خرج متغير القيمة من جهد دخل ثابت القيمة عن طريق استخدام دائرة إلكترونية تعمل كمفتاح وباستخدام هذه النوعية من المقطعات يمكن التحكم في سرعة المحرك المستمر على سبيل المثال والذي يتم تغذيته عن طريق جهد ثابت مستمر. وسوف يتم دراسة العواكس 'Inverters' في هذا الفصل ووظيفة هذا العاكس هو الحصول على جهد متناوب من جهد ثابت مستمر ويمكن التحكم في جهد وتردد خرج العاكس عن طريق التحكم في المفاتيح الإلكترونية والخاصة بهذه العواكس وعادة ما تكون هذه المفاتيح عبارة عن نبائض أو عناصر ذات الفصل والغلق المحكوم مثل الثايرستور والموسفت و IGBT ... .وهكذا و تعتبر العواكس دوائر إستاتيكية حيث لا تحتوي دوائرها على أي أجزاء متحركة وتحول هذه العواكس قدرة المصدر المستمر إلى قدرة مصدر متناوب بالجهد والتردد المطلوب. وعادة ما تكون موجة خرج العاكس على شكل موجة غير جيبية لزمن دوري معين و يوجد أنواع عديدة من العواكس حيث يتم تقسيم العواكس تبعا إلى:

- عدد الأوجه المتكون منها العاكس
- نوعية أشباه الموصلات المستخدمة لبناء العاكس

- مبدأ عمل إطفاء أشباه الموصلات المستخدمة
- شكل موجات الخرج الخاصة بالعواكس

وسوف يتم مناقشة ودراسة النوعين الرئيسيين وهما :

١. مصدر الجهد العاكس 'Voltage Source Inverter (VSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له جهد دخل ثابت مستمر.
٢. مصدر التيار العاكس 'Current Source Inverter (CSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له تيار دخل ثابت مستمر.

وعاده ما تكون العواكس أحادية أو ثلاثية الطور وسوف نكتفي بدراستنا في هذا الباب بالعواكس أحادية الطور.

التطبيقات الصناعية للعواكس

تستخدم العواكس في العديد من التطبيقات الصناعية المهمة مثل:

- التحكم في سرعة المحركات الحثية (induction motors) و المحركات المتزامنة (synchronous motors).
- التسخين بطريقة الحث (induction heating).
- مصادر التغذية الخاصة بالطائرات (aircraft power supplies).
- مصادر عدم انقطاع التيار (uninterruptible power supplies UPS).
- نقل القدرة المستمرة ذات الجهد الفائق (high-voltage DC transmission).
- مصادر التغذية الاحتياطية (standby power supplies).

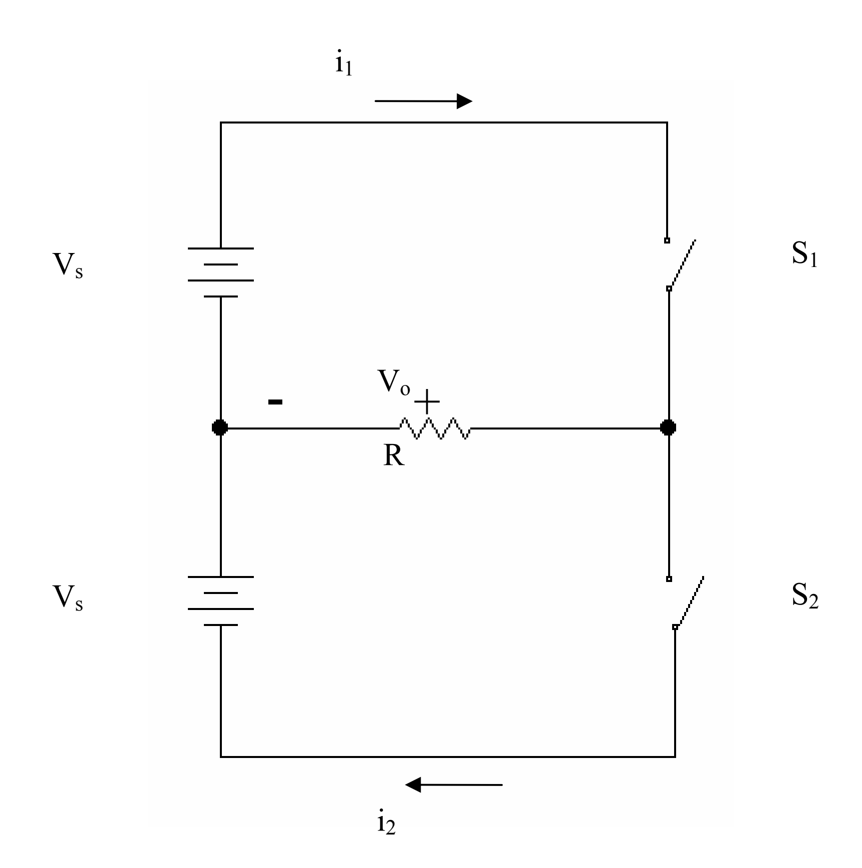
وعادة ما يكون مصدر جهد الدخل للعاكس عبارة عن بطارية (battery) لها جهد ثابت مستمر أو عبارة عن خلية شمسية (solar cell) بينما تكون الأنواع الفعلية للعواكس لها جهود إما ٢٢٠ فولت بتردد٦٠ هارتز أو ٢٢٠ فولت بتردد ٤٠٠ هارتز بينما للعواكس ثلاثية الطور ذات القدرة العالية تكون أنواع العواكس الفعلية إما ٣٨٠/٢٢٠ فولت بتردد ٥٠ هارتز أو ٢٠٨/١٢٠ فولت بتردد ٦٠ هارتز أو ٢٠٠/١١٥ فولت بتردد ٤٠٠ هارتز.

العاكس الرئيسي The Basic Inverter

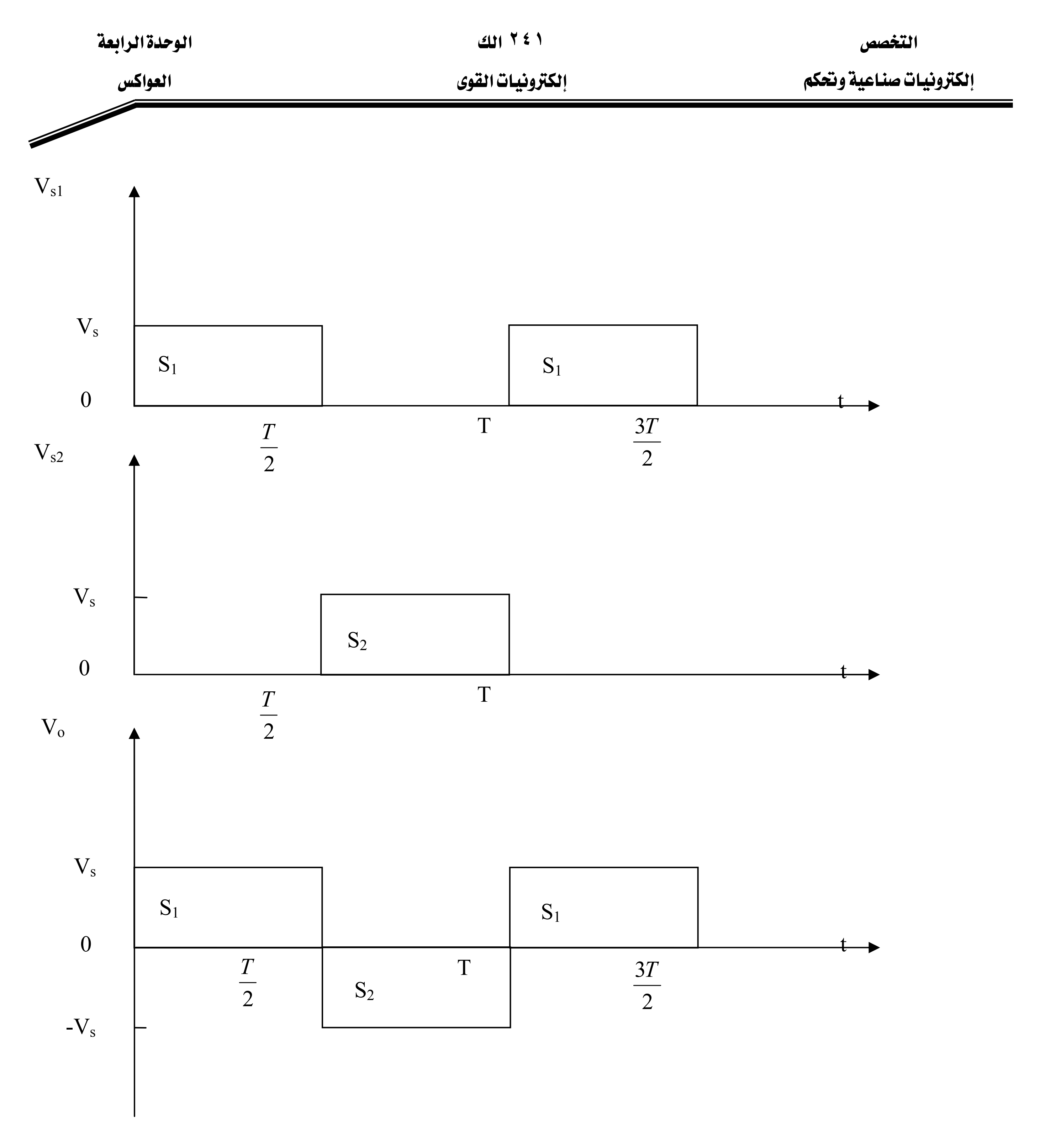
حالة الحمل المادي R:

يبين الشكل (٤ -١) الدائرة الرئيسية لعاكس نصف قنطري أحادي الطور ويكون الهدف الرئيسي من استخدام هذه الدائرة هو توليد جهد متناوب أحادي الطور من مصدر جهد ثابت مستمر. تتكون الدائرة من عدد ٢ مفاتيح إلكترونية حيث يتم التحكم في غلقهما وفصلهما عن طريق نبضات بوابات هذه المفاتيح الآتية من دائرة الإشعال الخاصة بهما. وعادة يتم تصميم النبضات بحيث يتم إغلق المفتاح S_1 بينما يكون المفتاح S_2 مفصول والعكس صحيح و لتحقيق هذا لابد أن تكون النبضات الخاصة بالمفتاحين S_1 , S_2 لها الموجات المبينة بالشكل (٤ -٢) بحيث عندما يكون جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S_1 لها قيمة عالية تكون قيمة جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S2 لها قيمة منخفضة في نفس الفترة الزمنية و العكس صحيح و بالتالي يتم توصيل الحمل بمصدر الجهد الثابت المستمر V_s عن طريق المفتاحين S_1 , S_2 كل منهما على حدة. فعندما يكون المفتاح S_1 مغلقاً يكون المفتاح S_2 مفصولاً و بالتالي تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر بينما عندما يتم إغلق المفتاح S_2 و فصل المفتاح S_1 تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر و بإشارة سالبة في هذه الحالة و بالتالي يتم الحصول على موجة جهد متناوب و على هيئة شكل مستطيل زمنها الدوري 'T' و يبين الشكل (٤ -٢) موجة خرج العاكس و يمكن تعيين تردد موجة خرج العاكس 'f_o' عن طريق قيمة الزمن الدوري حيث أن:

$$f_o = \frac{1}{T} \text{ Hz} \qquad (٤ -١)$$



الشكل (٤ -١): الدائرة الرئيسية لعاكس نصف قنطري أحادي الطور متصل بحمل مادي R.



الشكل (٤ -٢): موجتا نبضات المفتاحين S2, S1 و جهد خرج العاكس نصف القنطري أحادي الطور

ويمكن التحكم في قيمة تردد جهد الخرج عن طريق التحكم في زمن فتح وغلق المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2 . وعادة ما تكون موجة خرج الجهد المستطيلة للعاكس مناسبة لبعض التطبيقات غير المهمة بينما تكون موجة جهد خرج جيبي هي الموجة المثالية المطلوبة للعديد من التطبيقات.

ولجعل موجة خرج العاكس موجة جيبية أو موجة أقرب للموجة الجيبية فيمكن تحقيق ذلك باستخدام طريقتين فالطريقة الأولى تتحقق بوضع مرشح 'filter' عند خرج العاكس وغالبا عند تصميم هذا المرشح يراعى أن هذا المرشح لابد أن يتحمل قدرة خرج العاكس ولذلك يكون حجم هذا المرشح ضخماً تبعا لحجم قدرة العاكس وبالتالي تكون تكلفة ووزن هذا المرشح كبيرة إلى حد ما وأيضا كفاءة العاكس سوف تقل نتيجة للفاقد الموجود بالمرشح. والطريقة الثانية يمكن أن تتحقق باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM'.

وكما ذكر من قبل في الفصل السابق بأن هذه الطريقة تعتمد على فتح وفصل المفاتيح الإلكترونية وتعتمد على شكل النبضات الواصلة من دوائر إشعال هذه المفاتيح الإلكترونية وباستخدام هذه الطريقة يمكن تعديل شكل خرج العاكس وتحويله إلى أقرب موجة جيبية.

مصدر الجهد العاكس Voltage Source Inverter (VSI)

يعتبر مصدر الجهد العاكس هو أكثر الأنواع السائدة والمستخدمة لأنواع العواكس ويكون مصدر تغذية الجهد المستمر له قيمة ثابتة و لا يعتمد على تيار الحمل المسحوب و يمكن الحصول على مصدر تغذية الجهد الثابت المستمر من مصدر مستقل مثل البطارية أو من موحد محكوم و يوضع عادة مكثف كبير السعة عبر مصدر التغذية المستمر للعاكس و وظيفة هذا المكثف المحافظة على عدم حدوث أي تغيير لقيمة مصدر التغذية المستمر للعاكس حيث شحن و تفريغ المكثف يحافظ على استقرار قيمة مصدر التغذية و يحول العاكس جهد التغذية المستمر إلى موجة خرج مربعة متناوبة.

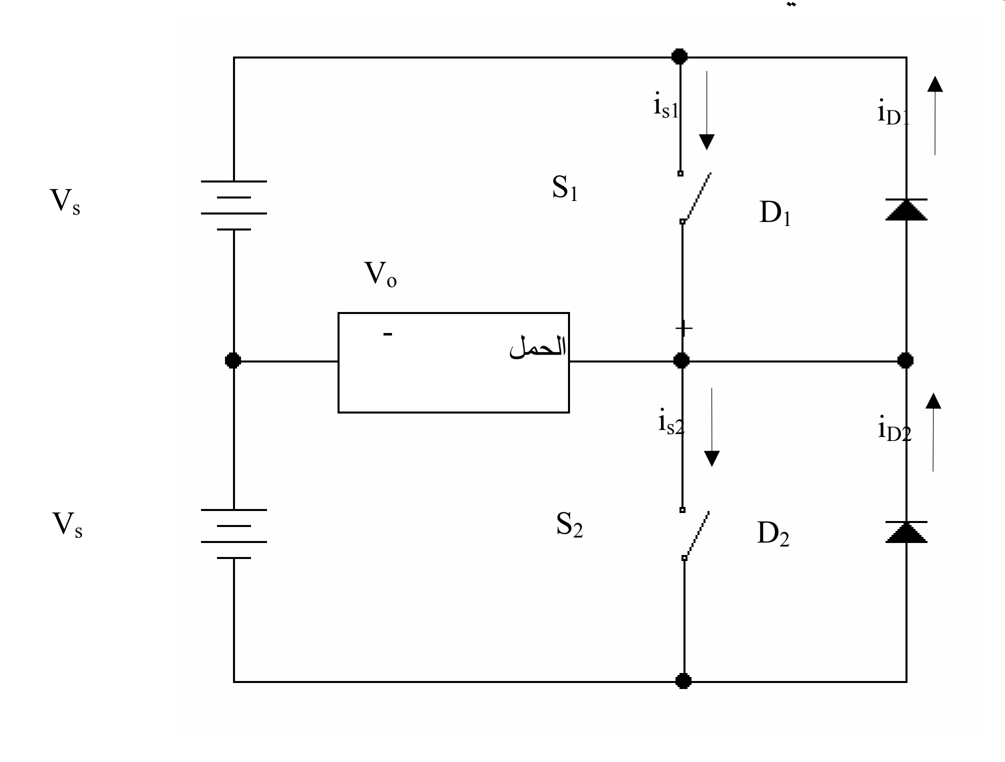
مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادى الطور 1-Phase Half-Bridge (VSI) Inverter

يتم استخدام دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري في تطبيقات القدرة المتخصصة ويبين الشكل (٤ -٣) دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور وتتكون هذه الدائرة من عدد ٢ مفاتيح إلكترونية S_1, S_2 و مصدرين تغذية جهد مستمر لهما نفس قيمة الجهد **'Vs'** وعدد ٢ دايود يقوما بوظيفة الدايود الحذافة و ذلك في حالة وجود حمل حثي. و يمكن أن تكون المفاتيح الإلكترونية المستخدمة عبارة عن ترنزستورات القوى أو الموسفت أو ثايرستورات بدوائر الإطفاء الخاصة بهم ... وهكذا.

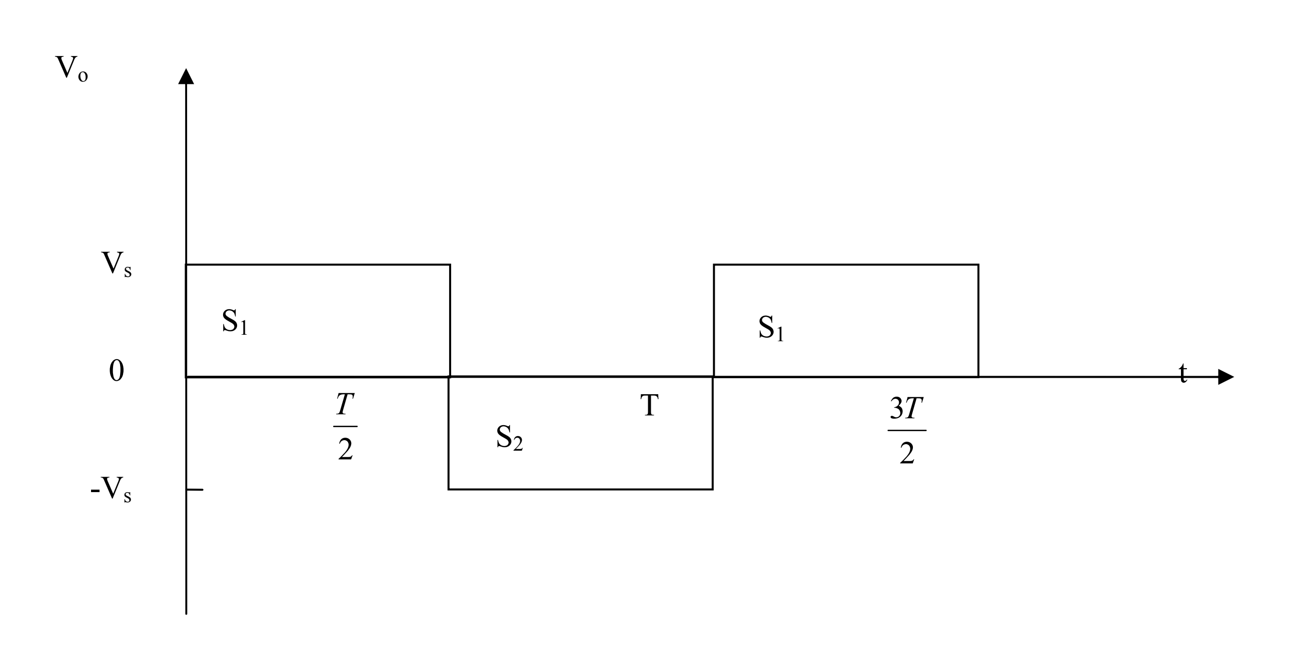
حالة الحمل المادي Case of a Resistive Load R

يتم إغلق و فصل المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2 للدائرة المبينة بالشكل (٤ -٣) في حالة وجود حمل مادي **R** بحيث عندما يتم إغلق المفتاح S_1 يكون المفتاح S_2 مفصول و ذلك خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T/2$ وتكون قيمة جهد خرج الحمل المادي لها قيمة ثابتة قيمتها 'V_s' حيث يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المستمر الثابت و الحمل المادي و المفتاح S_1 و تكون قيمة تيار الخرج هي نفسها تيار الحمل وقيمته i_1 وعند إغلق المفتاح S_2 يكون المفتاح S_1 مفصولاً خلال الفترة الزمنية $T/2 \le t \le T$ حيث يتم فصل المفتاح S_1 عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ و تكون قيمة جهد خرج الحمل المادي لها قيمة ثابتة '$-V_s$' في هذه الفترة الزمنية حيث يمر التيار i_2 خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل المادي و المفتاح S_2 و يكون اتجاه مرور التيار i_2 عكس مرور التيار i_1 و يبين الشكل (٤ -٤) موجة جهد الخرج في حالة وجود حمل مادي **R** حيث إن هذه الموجة ترددها **f** و تكون قيمة هذا التردد **1/T** و يمكن التحكم في قيمة تردد خرج العاكس بالتحكم في قيمة الزمن الدوري لموجة جهد الخرج.

ويجب مراعاة أن لا يحدث إغلق لكل من المفتاحين الإلكترونيين عند أي لحظة ما حيث سوف يحدث هذا دائرة قصر على أطراف مصدري الجهد الثابت '**Vs**'.



الشكل (٤ -٣): دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور

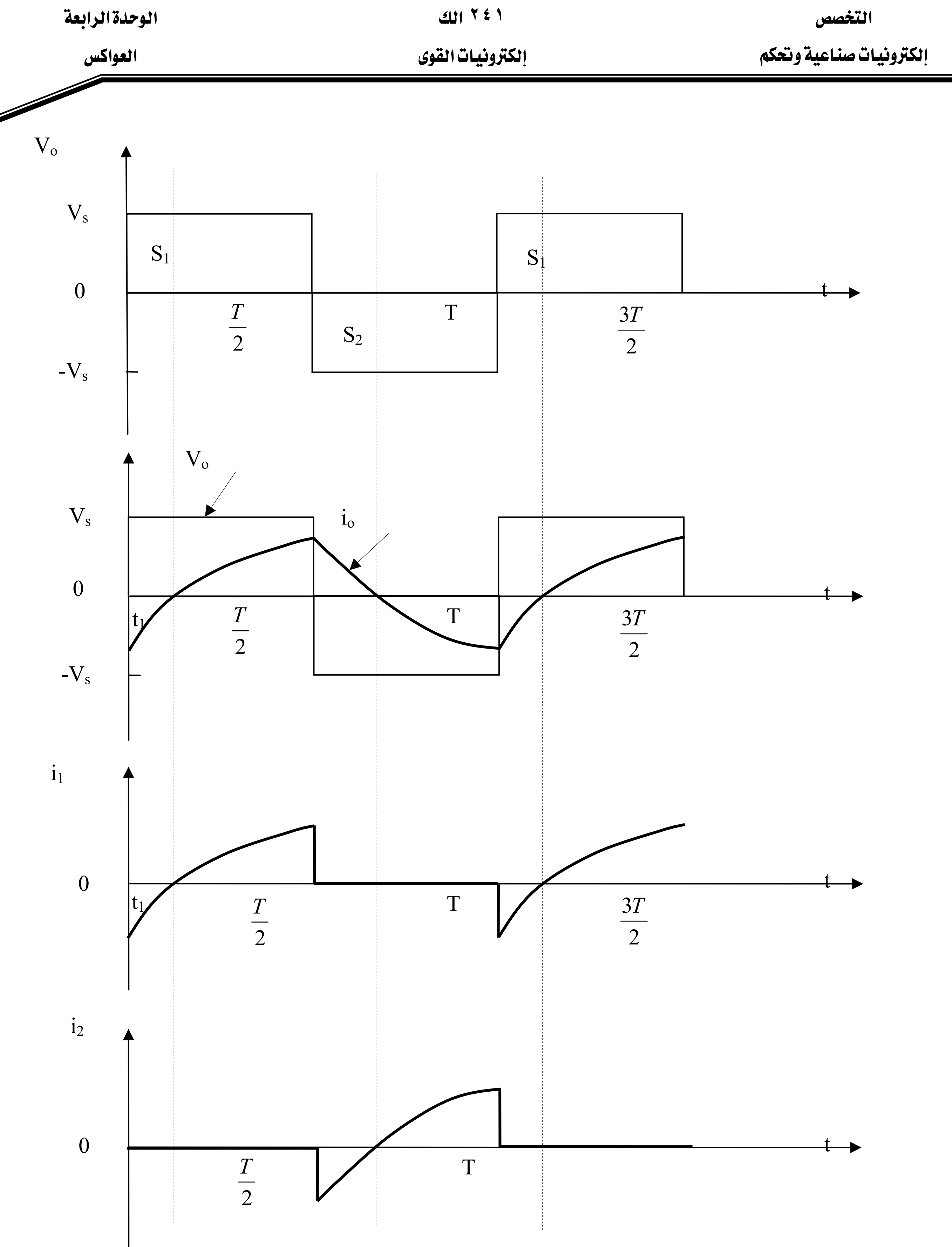


الشكل (٤ -٤): موجة جهد خرج العاكس النصف القنطري أحادي الطور

حالة الحمل الحثي Case of an Inductive load

كما سبق دراسته في الفصول السابقة فإنه في حالة وجود أحمال حثية فإن تيار الخرج $\mathbf{i_o}$ لا يمكن أن يعكس اتجاها عند نفس اللحظة التي يغير فيها جهد الخرج $\mathbf{V_o}$ قطبيته وفى تلك الحالة لابد من استخدام الدايود الحذافة و الذي يسمح بمرور تيار الحمل خلاله بنفس الاتجاه المار لتيار الخرج. و يبين الشكل (٤ -٥) موجات كل من جهد الخرج و تيار الخرج بالإضافة إلى كل من تياري المصدرين. ويمكن إيجاز عمل هذه الحالة تحت حالة الحمل الحثي كالآتي:

خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ يكون جهد الخرج V_o موجب و بالتالي خلال هذه الفترة الزمنية يكون كل من المفتاح الإلكتروني $\mathbf{S_1}$ أو الدايود الحذافة D_1 في حالة توصيل. يكون تيار الخرج $\mathbf{i_o}$ له قيمة سالبة نتيجة وجود الحمل الحثي و الذي يؤدي لتأخير تيار الحمل و خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ يمر التيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من الدايود الحذافة D_1 والحمل الحثي و مصدر الجهد المستمر الثابت $\mathbf{V_S}$ بينما خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_1 \le t \le T/2}$ يكون تيار الخرج موجباً و بالتالي يمر التيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من المفتاح الإلكتروني $\mathbf{S_1}$ و مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل الحثي مع ملاحظة بأن النبضة اللازمة لفتح المفتاح S_1 سوف تعطى له خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ و لكن هذا المفتاح سوف يوصل فقط خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_1 \le t \le T/2}$ حيث يكون تيار الخرج موجباً.



الشكل (٤ -٥): موجات جهد و تيار الخرج وتياري المصدرين

كما سبق تفسيره و عند اللحظة الزمنية $\mathbf{t = T/2}$ سوف يتم فصل المفتاح $\mathbf{S_1}$ و بالتالي سوف يتحول تيار الخرج من الدائرة المغلقة و المكونة من الحمل و المفتاح $\mathbf{S_1}$ و المصدر الثابت المستمر $\mathbf{V_S}$ إلى الدائرة

المكونة من الحمل و المصدر الثابت المستمر الموجود بأسفل و الدايود الحذافة D_2 و عند اللحظة الزمنية **$t=t_2$** يتم فصل التيار عن الدايود الحذافة D_2 حيث التيار سوف يتحول إلى قيمة سالبة بعد هذه اللحظة و بالتالي سوف يوصل المفتاح **S_2** خلال الفترة الزمنية **$t_2 \leq t \leq T$** و يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الثابت المستمر و الحمل الحثي و المفتاح **S_2** و نلاحظ أن المفتاح **S_2** معطى له نبضة خلال الفترة الزمنية **$T/2 \leq t \leq T$** حتى يتم قدحه خلال هذه الفترة الزمنية و سوف يتكرر عمل الدائرة كل فترة زمنها الدوري T. يبين الشكل (٤ -٥) العناصر الإلكترونية الموصلة خلال الفترات الزمنية المختلفة و نلاحظ بأن تيار الخرج i_o يكون متأخر عن جهد الخرج حيث إن الحمل حثي و أيضا يتم توصيل الدايودات الحذافة عندما يكون جهد وتيار الخرج لهما قطبية عكسية كما هو مبين بالشكل (٤ -٥) ويظهر الشكل تياري مصادر التغذية الثابتة **i_1, i_2** و يمكن أيضا الحصول على هذين التيارين من موجة تيار الخرج i_o حيث يتم تغذية الحمل من الجزء العلوي لمصدر التغذية الثابت المستمر و ذلك خلال الفترة الزمنية الموجبة لجهد الخرج **$0 \leq t \leq T/2$** بينما يتم تغذية هذا الحمل من الجزء السفلي لمصدر التغذية المستمر خلال الفترة الزمنية السالبة لجهد الخرج **$T/2 \leq t \leq T$**.

القيمة الفعالة لجهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور:

يمكن تمثيل القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري أحادي الوجه رياضيا كالآتي:

$$V_o = V_s \qquad (٤ -٢)$$

المركبة الأولى الفعالة لجهد الخرج $V_{1(rms)}$:

يمكن تمثيل القيمة اللحظية لجهد خرج دائرة العاكس والمبينة بالشكل (٤ -٣) باستخدام متسلسلة فوريه رياضيا كالآتي:

$$V_{1(rms)} = \sum_{n=1,3,5,...}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \qquad (٤ -٣)$$

حيث أن n هي رتبة التوافقيات و ω هي قيمة التردد الزاوي لجهد الخرج ووحدتها rad/s و يمكن تعيين القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى لجهد خرج العاكس و التي لها $n = 1$ كالآتي:

$$V_{1(rms)} = \frac{4V_s}{\pi\sqrt{2}} = 0.9V_s \qquad (٤ -٤)$$

مثال ٤ -١:

تتصل دائرة عاكس نصف قنطري أحادى الطور والمبينة بشكل (٤ -٣) بحمل مادي 'R' قيمته 2.4 Ω ومصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 24 V. أوجد:

(أ) القيمة الفعالة لجهد الخرج '$V_{o(rms)}$'.

(ب) القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' .

(ج) القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى '$V_{1(rms)}$'.

(د) قدرة الخرج 'P_o'.

الحل:

(أ) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري باستخدام المعادلة (٤ -٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s = 24 \quad \text{V}$$

(ب) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{V_{o(rms)}}{R} = \frac{24}{2.4} = 10 \quad \text{A}$$

(ج) يمكن أيضا استنتاج القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى باستخدام المعادلة (٤ -٣) كالآتي:

$$V_{1(rms)} = 0.9 V_s = 0.9 * 24 = 21.6 \quad \text{V}$$

(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي:

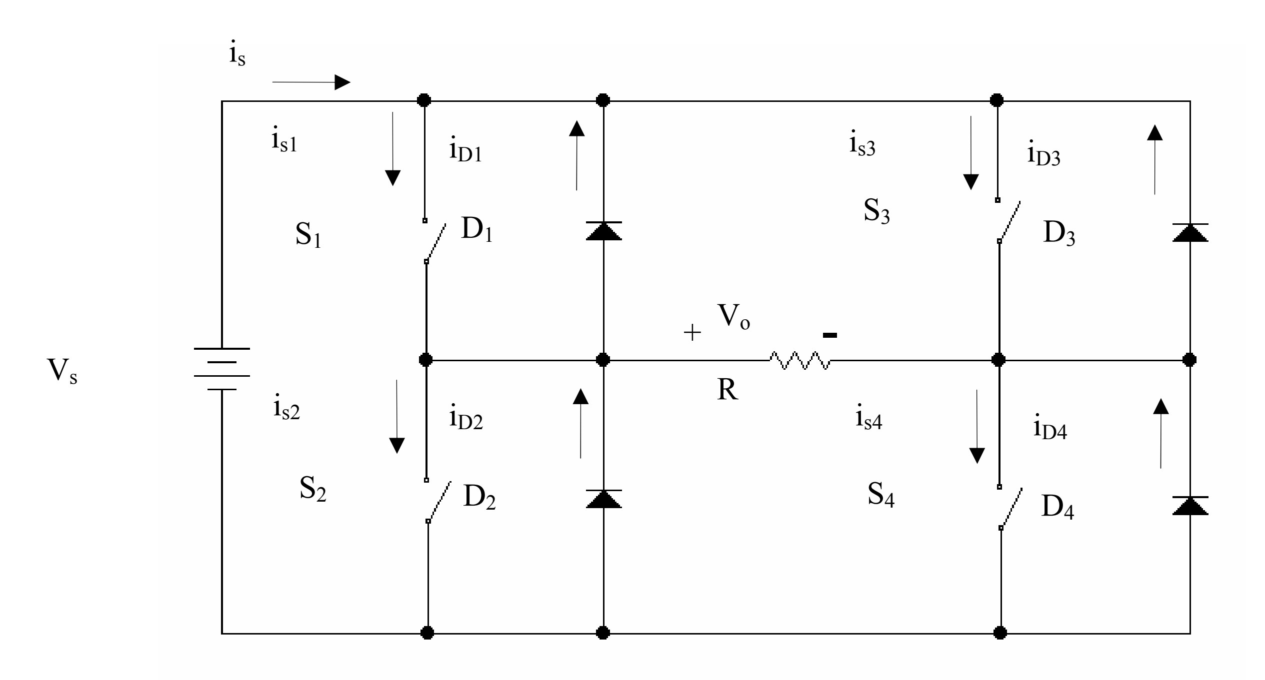
$$P_o = \frac{V_{o(rms)}^2}{R} = \frac{24^2}{2.4} = 240 \quad \text{W}$$

مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور 1-Phase Voltage Source Bridge Inverter

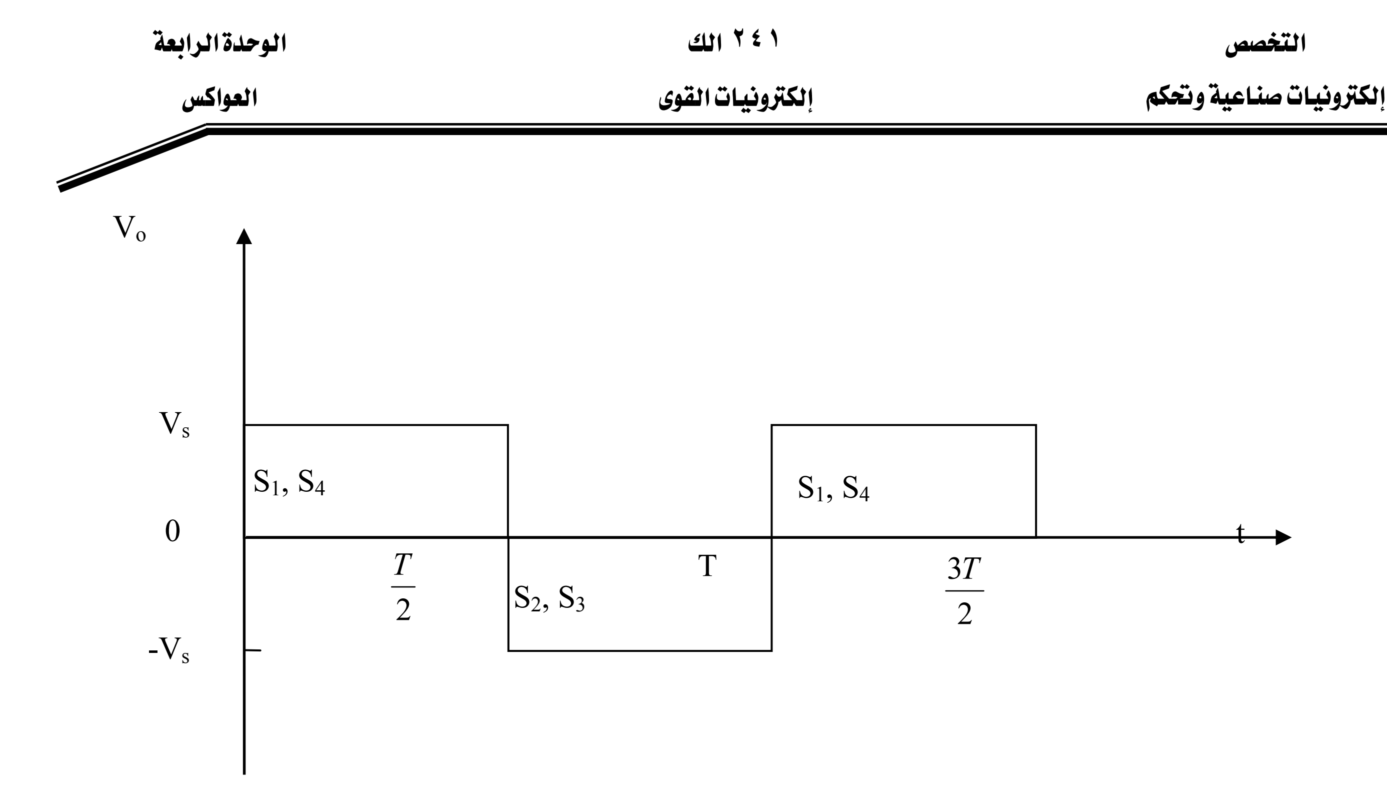
حالة الحمل المادي R

يمكن تكوين أو بناء دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادية الطور بإدماج دائرتي مصدر جهد عاكس نصف قنطري أحادي الطور ويبين الشكل (٤ -٦) الدائرة الأساسية لمصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور ويتطلب لبناء هذه الدائرة عدد ٤ مفاتيح إلكترونية وعدد ٤ دايودات حذافة و مصدر جهد ثابت مستمر. تكون قيمه جهد خرج دائرة العاكس ضعف قيمة جهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور. يتم إغلق وفصل المفاتيح الإلكترونية لهذه الدائرة بطريقة قطرية

أي بمعنى عندما يتم إغلق كل من المفتاحين S_1, S_4 يكون كل من المفتاحين S_2, S_3 مفصولين بينما عند إغلق المفتاحين S_2, S_3 يتم فصل المفتاحين S_1, S_4 وهكذا وبالتالي سوف يوصل كل من المفتاحين S_1, S_4 أو المفتاحين S_2, S_3 فترة زمنية قيمتها نصف قيمة الزمن الدوري **'T/2'** ويمكن إيجاز فكرة عمل الدائرة كالتالي: يتم إغلق المفتاحين S_1, S_4 خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T/2$ وذلك بإعطاء نبضات كافية لقدحهما من دائرة الإشعال الخاصة بهما وخلال هذه الفترة الزمنية يظل كل من المفتاحين S_2,S_3 مفصولان وبالتالي سوف يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر والحمل المادي والمفتاحان S_1, S_4 وبالتالي تكون قيمة جهد الخرج **'V_o'** هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر **'V_s'** ويتم أيضا فصل المفتاحين S_1, S_4 و إغلق المفتاحين S_2, S_3 خلال الفترة الزمنية $T/2 \le t \le T$ وخلال هذه الفترة الزمنية يمر التيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل المادي و المفتاحين S_2, S_3 و يكون مرور التيار في اتجاه عكسي لمروره في الفترة الزمنية السابقة وبالتالي تكون قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر ولكن بإشارة سالبة أي تكون قيمتها **'$-V_o$'** وبالتالي سوف تكون شكل موجة جهد الخرج والمبينة بالشكل (٤ -٧) على هيئة موجة مربعة قيمتها العظمى V_s. ونلاحظ بأن تردد موجة جهد الخرج يمكن التحكم فيها بالتحكم في زمن وغلق المفاتيح الإلكترونية حيث إن تردد موجة الخرج **'f_o'** تعتمد قيمتها على قيمة الزمن الدوري **'T'** حيث إن $f_o = 1/T$.



الشكل (٤ -٦): الدائرة الأساسية لمصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور و المتصل بحمل مادي



الشكل (٤ -٧): موجة جهد خرج مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور

القيمة الفعالة لجهد خرج دائرة العاكس القنطري أحادي الطور $V_{o(rms)}$:

يمكن تمثيل معادلة جهد الخرج الفعال لدائرة العاكس القنطري بالمعادلة (٤ -٢) حيث إن موجة جهد خرج هذا العاكس لها نفس موجة دائرة العاكس نصف القنطري.

المركبة الأولى الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري $V_{1(rms)}$:

كما سبق الإشارة إليه في الفقرة السابقة فيمكن تمثيل معادلتي القيمة اللحظية لجهد الخرج والقيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى لجهد الخرج والتي لها $n = 1$ بالمعادلات (٤ -٣) و (٤ -٤) على الترتيب.

مثال ٤ -٢:

تتصل دائرة عاكس قنطري أحادى الطور والمبينة بالشكل (٤ -٣) بحمل مادي 'R' قيمته 2.4 Ω ومصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 48 V. أوجد:

(أ) القيمة الفعالة لجهد الخرج '$V_{o(rms)}$'.

(ب) القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' .

(ج) القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى '$V_{1(rms)}$'.

(د) قدرة الخرج 'P_o'.

الحل:

بما أن الدائرة المستخدمة في هذا المثال مكافئة للدائرة المستخدمة في المثال السابق "مثال (٤ -١)" والقيمة المادية للحمل هي نفسها القيمة المستخدمة بالمثال السابق وقيمة جهد المصدر الثابت المستمر هي نفسها قيمة جهدي المصدران الثابتان المستمران بالمثال السابق وبالتالي يمكن استخدام نفس القوانين التي تم استخدامها بالمثال السابق في حل هذا المثال كالآتي:

(أ) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري باستخدام المعادلة (٤ -٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s = 48 \quad \text{V}$$

(ب) يمكن ايجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{V_{o(rms)}}{R} = \frac{48}{2.4} = 20 \quad \text{A}$$

(ج) يمكن أيضا استنتاج القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى باستخدام المعادلة (٤ -٣) كالآتي:

$$V_{1(rms)} = 0.9 V_s = 0.9 * 48 = 43.2 \quad \text{V}$$

(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي

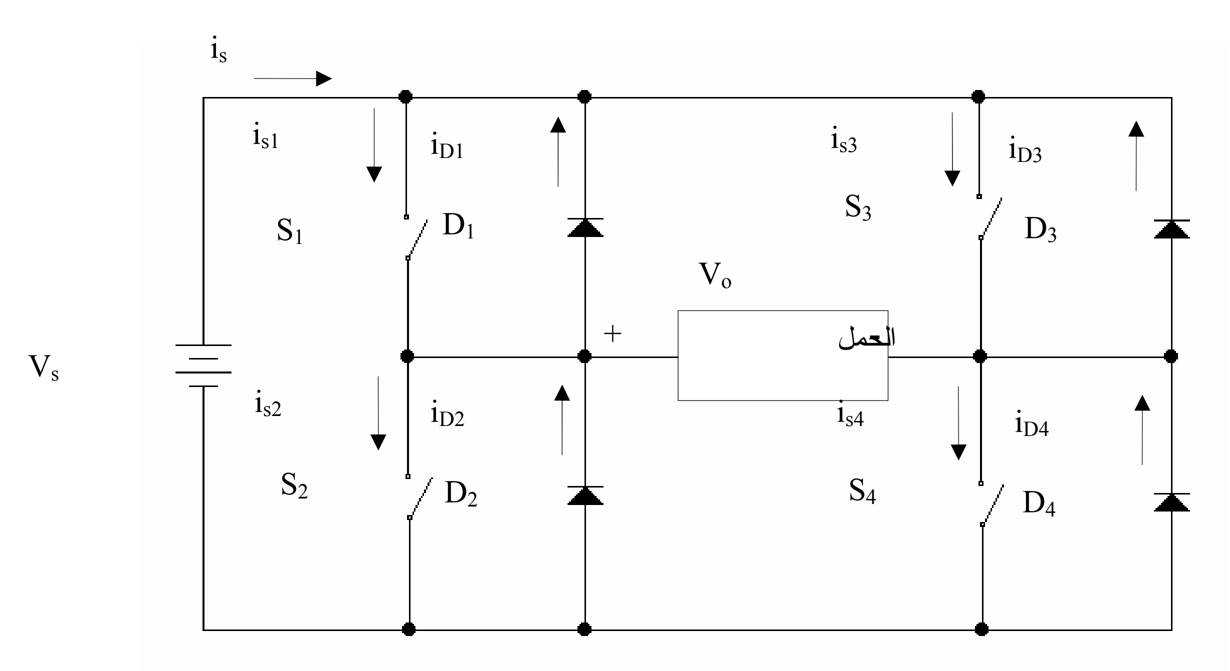
$$P_o = \frac{V_{o(rms)}^2}{R} = \frac{48^2}{2.4} = 960 \quad \text{W}$$

بمقارنة نتائج هذا المثال والمثال السابق نجد أن قيمة جهد خرج العاكس القنطري ضعف قيمة جهد خرج العاكس نصف القنطري و أيضا قيمة قدرة الحمل للعاكس المستخدم هنا قيمته ٤ أمثال قدرة الحمل للعاكس نصف القنطري و بالتالي يعتبر العاكس القنطري أفضل للقدرة العالية.

حالة الحمل الحثي 'R-L'

يبين الشكل (٤ -٨) دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل حثي 'R-L' ونلاحظ أن الدائرة المستخدمة هي نفس الدائرة المستخدمة بالشكل (٤ -٦) إلا أنه تم استبدال الحمل المادي 'R' بحمل حثي 'R-L' ويبين الشكل (٤ -٩) موجات كل من جهد الخرج **'V_o'** وتيار الخرج **i_o**

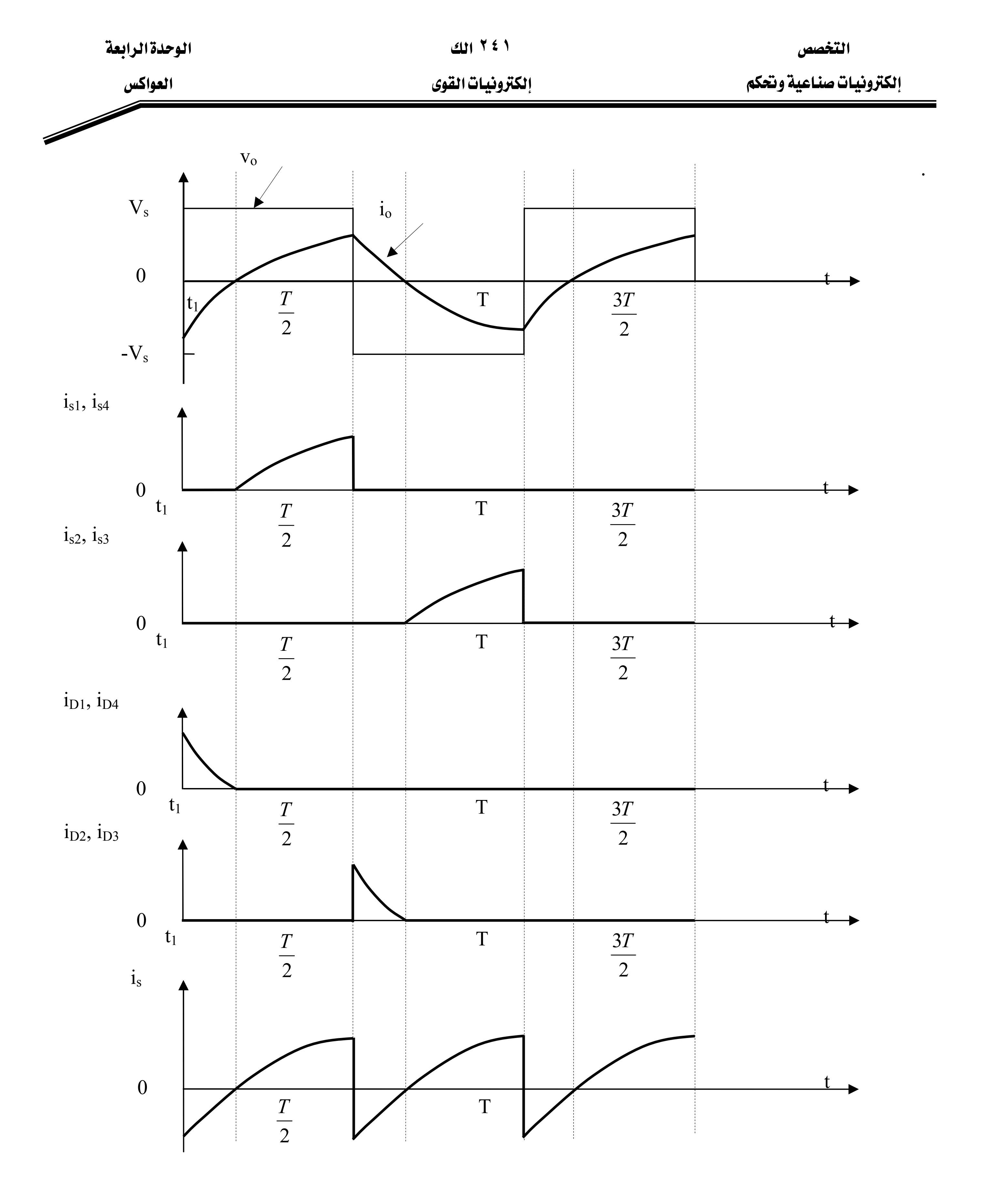
وتيارات المفاتيح الإلكترونية S_4, S_3, S_2, S_1 و تيارات الدايودات الحذافة D_4, D_3, D_2, D_1 بالإضافة إلى تيار مصدر الجهد الثابت المستمر 'i_s' ويمكن إيجاز مبدأ عمل الدائرة في حالة وجود الحمل الحثي كالآتي:



الشكل (٤ -٨): دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل حثي.

يكون تيار الخرج 'i_o' والمبين بالشكل (٤ -٩) متأخرا عن جهد الخرج 'v_o' بسبب وجود الحمل الحثي وبالتالي لا يمكن حدوث قدح للمفتاحين S_4, S_1 خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ حيث إن $\mathbf{t_1}$ هي اللحظة الزمنية التي يكون عندها قيمة تيار الخرج صفراً وهذا بالرغم من إعطاء نبضة كافية لإشعالهما عن طريق دوائر الإشعال الخاصة بهما ويعود السبب بأنه خلال هذه الفترة الزمنية سوف يكون كل من هذين المفتاحين في حالة انحياز خلفي وسوف يمر فيهما التيار ابتداء من اللحظة الزمنية $t = t_1$ حتى اللحظة الزمنية $t = T/2$ وبالتالي خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايودين الحدافين D_4, D_1 ومصدر الجهد الثابت المستمر 'V_s' ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و المفتاحين S_4, S_1 ومصدر الجهد الثابت المستمر خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_1 \le t \le T/2}$ حيث سيكون هذان المفتاحين في حالة انحياز أمامي وتكون قيمة جهد الخرج 'V_o' هي نفسها قيمة مصدر الجهد الثابت المستمر 'V_s' خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ ونلاحظ نتيجة لوجود الحمل الحثي تكون قيمة تيار الخرج 'i_o' له قيمة صفرية عند اللحظة الزمنية $t = t_1$ بينما تكون له قيمة لا صفرية عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ وكما نعلم فإن تيار الخرج لا يمكن أن يتحول من قيمة لا صفرية

إلى قيمة صفرية عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ لوجود الحمل الحثي وبالتالي سيتحول مسار تيار الخرج من الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي والمفتاحين S_4, S_1 ومصدر الجهد الثابت المستمر إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايودين الحدافين D_3, D_2 ومصدر الجهد الثابت المستمر 'V_s' خلال الفترة الزمنية $\mathbf{T/2 \leq t \leq t_2}$ وتكون قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر ولكن بإشارة سالبة أي أن $V_o = - V_s$ ويرجع سبب وجود تيار خرج خلال هذه الفترة الزمنية بسبب وجود طاقة مغناطيسية مختزنة بالملف الحثي وتصبح قيمة تيار الخرج 'i_o' عند اللحظة الزمنية $t = t_2$ قيمة صفرية ونلاحظ أن كلا من المفتاحين S_2, S_3 يكون في حالة انحياز خلفي خلال الفترة الزمنية $\mathbf{T/2 \leq t \leq t_2}$ بالرغم من وجود نبضات كافية لقدح هذين المفتاحين وهذه النبضات آتية من دوائر الإشعال الخاصة بهذه المفاتيح الإلكترونية و بالتالي سوف يعكس تيار الخرج 'i_o' اتجاه في الفترة الزمنية $\mathbf{t_2 \leq t \leq T}$ و سوف يوصل كل من المفتاحين S_2, S_3 لوجود النبضة الكافية لقدح كل منهما و يمر التيار في الدائرة المغلقة و المكونة من الحمل الحثي و المفتاحين S_2, S_3 و مصدر الجهد الثابت المستمر 'V_s' خلال هذه الفترة الزمنية و يكون أيضا قيمة جهد الخرج هي قيمة جهد المصدر و لكن بإشارة سالبة أي أن $V_o = - V_s$ نلاحظ بأن تيار الخرج قيمته 'I_{min}' عند اللحظة الزمنية $t=T, t=0$ بينما يكون تيار الخرج قيمته 'I_{max}' عند اللحظة الزمنية $t=3{\cdot}T/2, t=T/2$ حيث إن التيار I_{min} هي أقل قيمة يصل إليها تيار الخرج و فى حالتنا هذه تكون القيمة المطلقة لكل من القيمة العظمى و القيمة الصغرى لتيار الخرج لها قيمة متساوية



الشكل (٤ -٩): موجات جهد الخرج وتيار الخرج وتيارات الدايودات الحذافة والمفاتيح الإلكترونية والمصدر الثابت المستمر.

القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري:

حيث أن موجة جهد خرج العاكس القنطري لا تعتمد على طبيعة الحمل سواء حمل مادي أو حثي و تأخذ شكل الموجة المربعة و بالتالي يمكن التعبير عن القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري بالمعادلة (٤ -١).

القيمة اللحظية لتيار الخرج:

يمكن التعبير عن القيمة اللحظية لتيار خرج العاكس القنطري بالمعادلة التالية:

$$i_o = \begin{cases} \frac{V_s}{R} + (I_{\min} - \frac{V_s}{R}) e^{-t/\tau} & 0 \le t \le \frac{T}{2}c \\ -\frac{V_s}{R} + (I_{\max} + \frac{V_s}{R}) e^{-(t + -\frac{T}{2}\tau)/\tau} & \frac{T}{2} \le t \le T \end{cases} \quad (٤ -٤)$$

حيث أن: τ : هي قيمة الثابت الزمني للملف الحثي و قيمته L/R .

I_{min}: هي القيمة الصغرى لتيار الخرج.

I_{max}: هي القيمة العظمى لتيار الخرج.

علمًا بأن القيمة الصغرى لتيار الخرج هي نفس القيمة العظمى لتيار خرج العاكس القنطري و لكن بإشارة سالبة أي أن:

$$I_{\min} = -I_{\max} \quad (٤ -٥)$$

يمكن تعيين القيمة العظمي و الصغرى لتيار الخرج بالمعادلة التالية:

$$I_{\max} = -I_{\min} = \frac{V_s}{R}\left[\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}}\right] \quad (٤ -٦)$$

مثال ٤ -٣:

تتصل دائرة عاكس قنطري أحادي الطور و المبينة بالشكل (٤ -٨) بحمل حثي 'R' قيمته المادية 10 Ω و قيمة ملفه الحثي L = 25 mH و مصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 100 V. إذا علمت بأن تردد فصل و إغلق المفاتيح الإلكترونية 60 Hz ، فأوجد معادلة تيار الخرج اللحظي:

الحل:

يمكن تعيين الزمن الدوري لجهد الخرج والثابت الزمني للملف الحثي كالآتي:

$$T=\frac{1}{f_o}=\frac{1}{60}=0.0167\text{ s}$$

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{0.025}{10}=0.0025\text{ s}$$

$$\therefore\frac{T}{2\tau}=\frac{0.0167}{2*0.0025}=6.67$$

يمكن تعيين القيمة الصغرى و العظمي لتيار الخرج باستخدام المعادلة (٤ -٥) كالآتي:

$$I_{max}=-I_{min}=\frac{100}{10}.\left[\frac{1-e^{-6.67}}{1+e^{-6.67}}\right]=9.31\text{ A}$$

وبالتالي يمكن تعيين معادلة تيار الخرج اللحظي باستخدام المعادلة (٤ -٤) كالآتي:

$$i_o(t)=\frac{-100}{10}+(-9.31-\frac{100}{10})e^{-t/0.0025}$$

$$=10-19.31e^{-t/0.0025}\qquad 0\le t\le\frac{1}{120}$$

$$i_o(t)=\frac{-100}{10}+(9.31+\frac{100}{10})e^{-(t-\frac{0.0167}{2})/0.0025}$$

$$=10+19.31e^{-(t-0.00835)/0.0025}\qquad \frac{1}{120}\le t\le\frac{1}{60}$$

طرق التحكم في جهد خرج العاكس Inverter Voltage Control Techniques

يتطلب التحكم في جهد خرج العاكس المتناوب في معظم التطبيقات الصناعية و يمكن تقسيم الأنواع المختلفة في جهد العاكس إلى ثلاثة أنواع رئيسية وهم:

١. التحكم في قيمة جهد تغذية العاكس المستمر.
٢. التحكم في جهد خرج العاكس المتناوب.
٣. التحكم في طريقة فصل وغلق المفاتيح الإلكترونية للعاكس.

وتعتبر الطريقة الأولى هي أبسط أنواع التحكم في جهد خرج العاكس حيث إن جهد خرج العاكس يتناسب طرديًا مع قيمة جهد الدخل المستمر للعاكس حيث يمكن التحكم في قيمة جهد دخل العاكس عن طريق استخدام مقطع تيار مستمر عند دخل العاكس بدلا من البطاريات الثابتة الموجودة عند دخله وبالتحكم في أزمنة إغلق و فصل هذه المفاتيح الإلكترونية لمقطع التيار المستمر يمكن التحكم في قيمة

دخل العاكس و يمكن أيضا التحكم في قيمة جهد خرج العاكس المتناوب عن طريق وضع منظم جهد متناوب بين خرج العاكس و الحمل و يمكن التحكم في قيمة جهد خرج العاكس بالتحكم في جهد هذا المنظم.

تعتبر الطريقة الثالثة هي أكثر الطرق الشائعة والمستخدمة في معظم التطبيقات العملية والصناعية وغالبا ما تسمى هذه الطريقة بطريقة تعديل عرض النبضة 'PWM' ويفضل استخدام هذه الطريقة حيث يمكن التحكم في موجة جهد خرج العاكس و الحصول على موجة خرج بأقل توافقيات ممكنة بهدف الحصول على أقرب موجة خرج جيبيه و يمكن إيجاز الأسلوب المتبع لطريقة تعديل عرض النبضة في الفقرة التالية.

تعديل عرض النبضة Pulse-Width Modulation PWM

تعتبر الطرق الثلاثة التالية أهم الطرق المستخدمة والمندرجة تحت مسمى تعديل عرض النبضة و هذه الطرق هم:

١. تعديل وحيد لعرض النبضة Single Pulse-Width Modulation.
٢. تعديل متضاعف لعرض النبضة Multiple Pulse-Width Modulation.
٣. تعديل جيبي لعرض النبضة Sinusoidal Pulse-Width Modulation.

تعديل وحيد لعرض النبضة

يتم التحكم في قيمة جهد خرج العاكس بالتحكم في عرض النبضة الوحيدة و الموجودة كل نصف دورة. يبين الشكل (٤ -١٠) جهد خرج العاكس و نبضات التحكم الخاصة بالمفتاحين الإلكترونيين S_2, S_1 و الموجودين عند البوابة الخاصة بهما في حالة مصدر جهد عاكس قنطري أحادي الطور والمبين بالشكل (٤ -٦) حيث يتم توليد هذه النبضات عن طريق مقارنة موجة مستطيلة مرجعية قيمتها A_r بموجة مثلثية حاملة قيمتها A_c. يعين تردد الموجة المستطيلة المرجعية التردد الرئيسي (المركبة الأولى) لجهد خرج العاكس و بتغيير قيمة A_r من صفر إلى A_c يتم الحصول على نبضة عرضها δ والتي يمكن التحكم في عرض النبضة من صفر حتى 180^o وتعرف نسبة A_r بالنسبة إلى A_c بمعامل التعديل 'Modulation Index' وقيمة هذا المعامل هي:

$$M = \frac{A_r}{A_c} \qquad (٤ -٦)$$

و تكون القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس 'V_o' في هذه الحالة هي:

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \qquad (٤ -٧)$$

حيث أن:

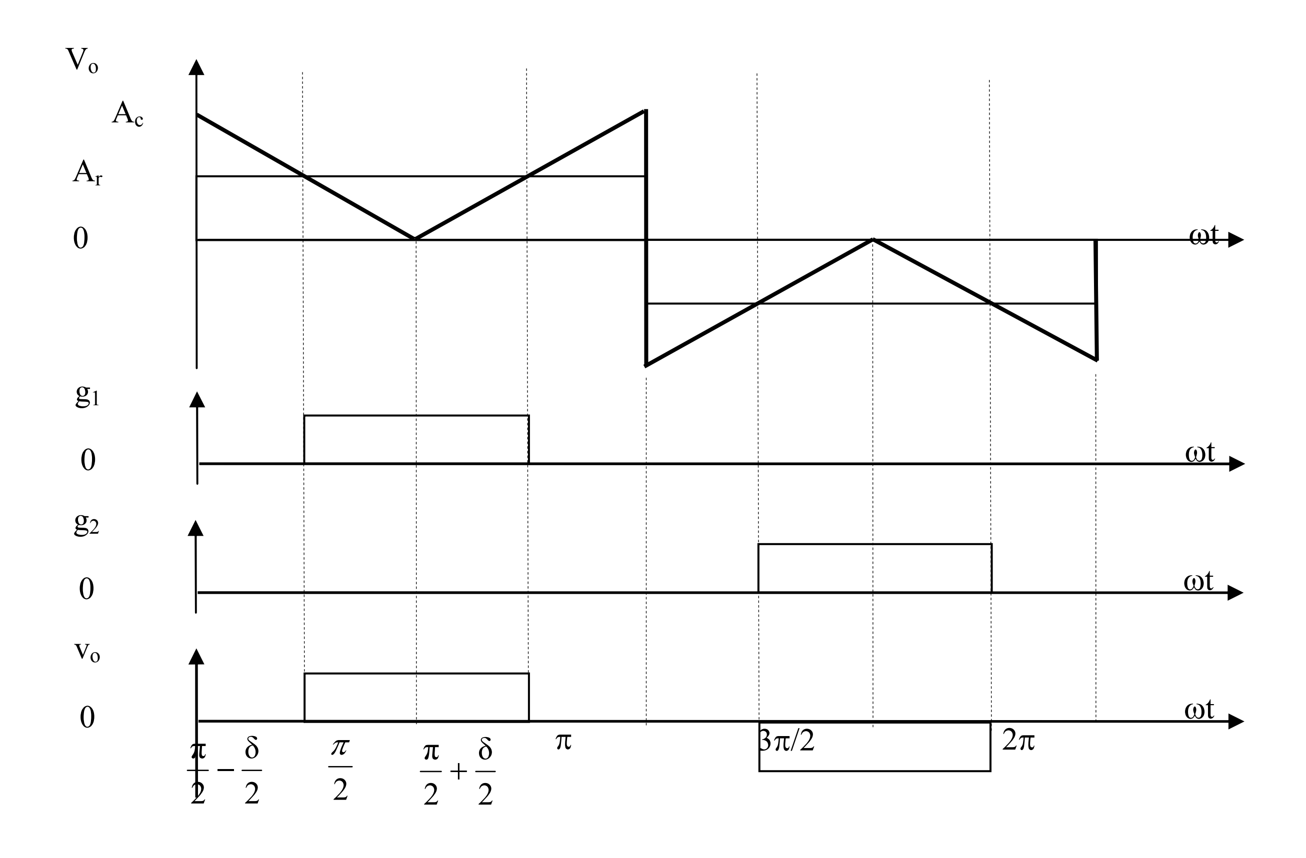
M: هي معامل التعديل.

V_s: هي قيمة جهد المصدر الثابت المستمر.

A_r: هي قيمة الموجة المستطيلة المرجعية.

A_c: هي قيمة الموجة المثلثية الحاملة.

δ: هي قيمة عرض نبضة جهد الخرج.



الشكل (٤ -١٠): جهد خرج العاكس ونبضات التحكم الخاصة بالمفتاحين الإلكترونيين S2, S1 للعاكس قنطري أحادي الطور

تعديل متضاعف لعرض النبضة

يمكن تقليل التوافقيات المصحوبة مع موجة جهد خرج العاكس بزيادة عدد النبضات الموجودة في كل نصف دورة زمنية و يتم توليد النبضات للمفاتيح الإلكترونية عن طريق مقارنة موجة مستطيلة مرجعية بموجة مثلثية حاملة و تكون الموجة المستطيلة لها تردد قيمته f_o و هذا التردد هو الذي يعين تردد خرج العاكس بينما الموجة المثلثية الحاملة لها تردد يحدد عدد النبضات الموجودة في كل نصف دورة زمنية عن طريق تردد الموجة الحاملة f_c. يبين الشكل (٤ -١١) الموجة المستطيلة المرجعية والموجة المثلثية الحاملة وموجة جهد خرج العاكس حيث إن عدد النبضات الموجودة كل نصف دورة يتم تعيينه من المعادلة التالية:

$$P=\frac{f_c}{2f_0}=\frac{m_f}{2} \quad , \quad m_f=\frac{f_c}{f_o} \qquad (٤ -٨)$$

حيث أن:

P: هي عدد النبضات الموجودة كل نصف دورة.

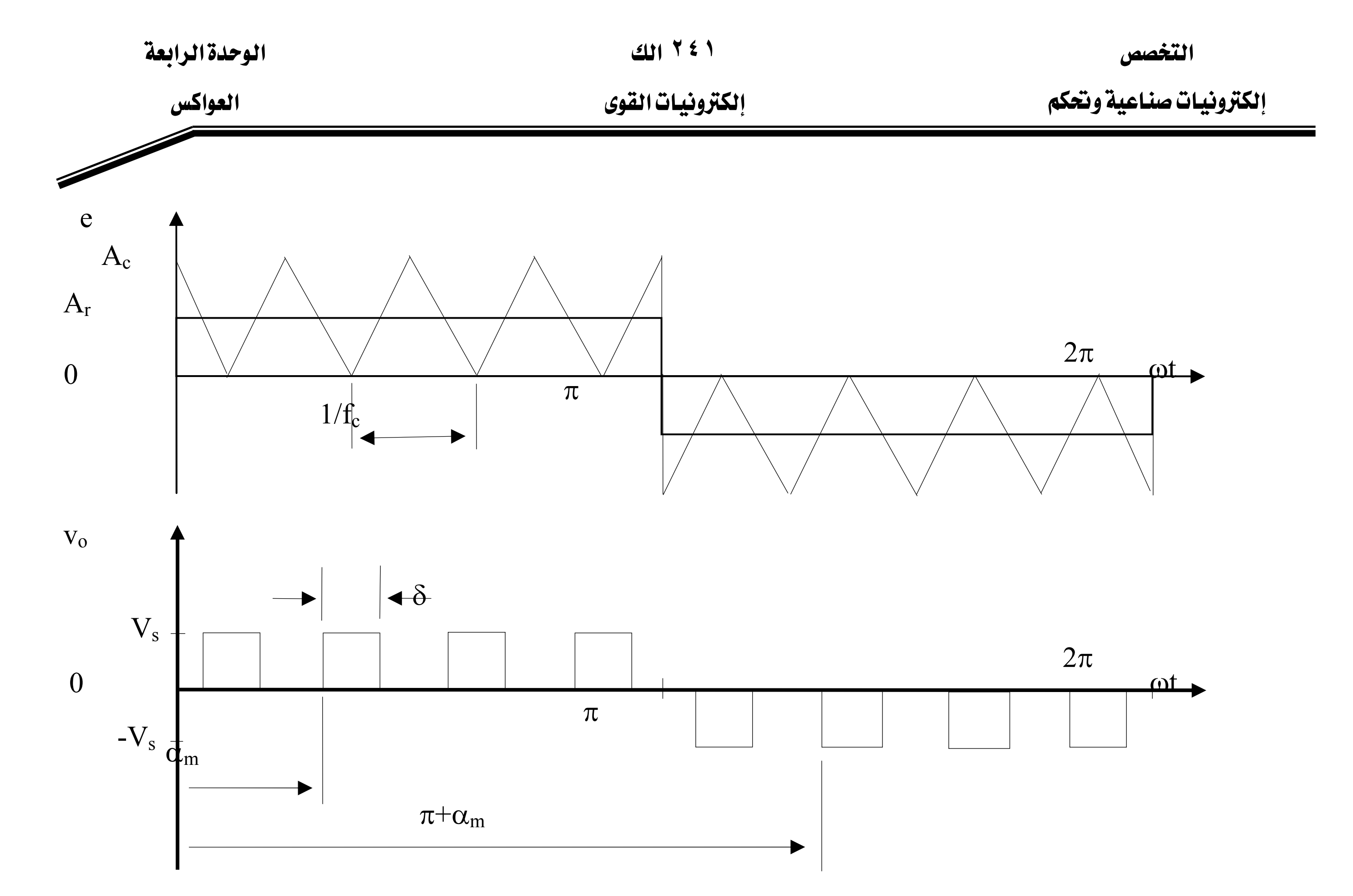
f_c: هي قيمة تردد الموجة المثلثية الحاملة.

f_o: هي قيمة تردد الموجة المستطيلة المرجعية.

m_f: هي قيمة نسبة تعديل التردد.

و يمكن تغيير عرض النبضة بالتحكم في قيمة معامل التعديل 'M' و بالتحكم في قيمة M من صفر حتى ١ تتغير قيمة جهد خرج العاكس من صفر حتى V_s و تتغير قيمة عرض النبضة من صفر حتى π/P و تكون القيمة الفعالة لجهد خرج مصدر جهد العاكس القنطري أحادي الطور في هذه الحالة كالآتي:

$$V_o=V_s\sqrt{\frac{\delta P}{\pi}} \qquad (٤ -٩)$$



الشكل (٤ -١١): الموجة المستطيلة المرجعية والموجة المثلثية الحاملة وموجة جهد خرج العاكس

تعديل جيبي لعرض النبضة

يمكن الحصول على نبضات بعرض غير منتظم بدلا من النبضات المنتظمة و التي لها عرض ثابت المتولدة بطريقة تعديل متضاعف لعرض النبضات و ذلك باستخدام طريقة التعديل لجيبي لعرض النبضة. يكون عرض النبضة متناسبا مع قيمة الموجة الجيبية و يمكن تقليل التوافقيات و تحسين الشكل الموجي لجهد الخرج باستخدام هذه الطريقة. يبين الشكل (٤ -١٢) نبضات المفتاحين S_1 ,S_2 والتي يمكن الحصول عليها بمقارنة موجة جيبيه مرجعية ترددها f_o بموجة مثلثية حاملة ترددها f_c و تستخدم غالبا هذه الطريقة في التطبيقات الصناعية و يحدد تردد الموجة الجيبية المرجعية تردد جهد خرج العاكس و تتحكم القيمة الجيبية القصوى في قيمة معامل التعديل 'M' و بالتالي يمكن التحكم في القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس 'V_o' ويبين أيضا الشكل (٤ -١٢) القيمة اللحظية لجهد خرج العاكس. يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس بالمعادلة الآتية:

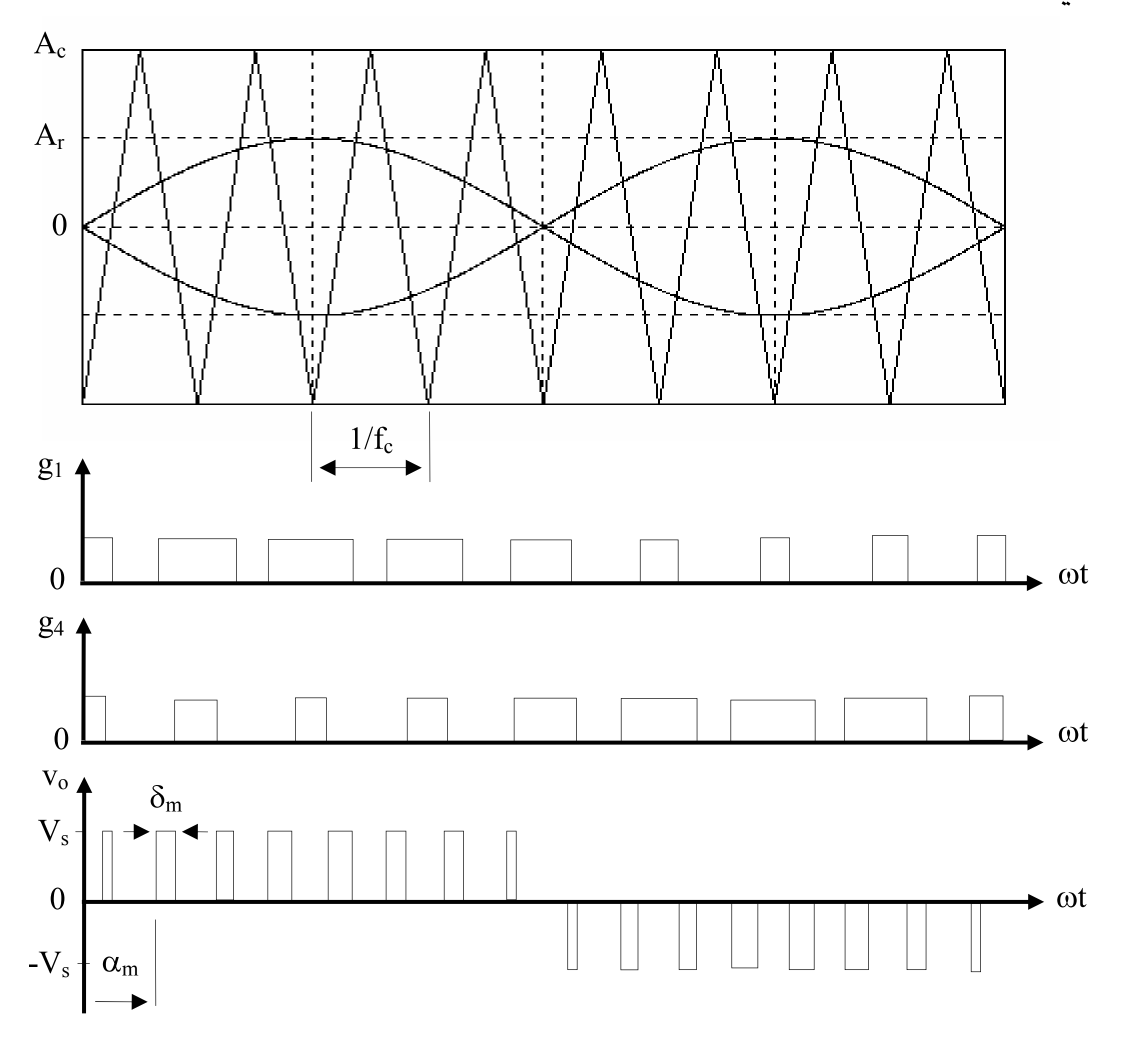
$$V_o = V_s \sqrt{\sum_{m=1}^{P} \frac{\delta_m}{\pi}}$$

حيث أن:

P: هي عدد النبضات الموجودة في نصف دورة.

δ_m : هي عرض النبضة والقابلة للنبضة رقم m.

V_s: هي قيمة الجهد الثابت المستمر.



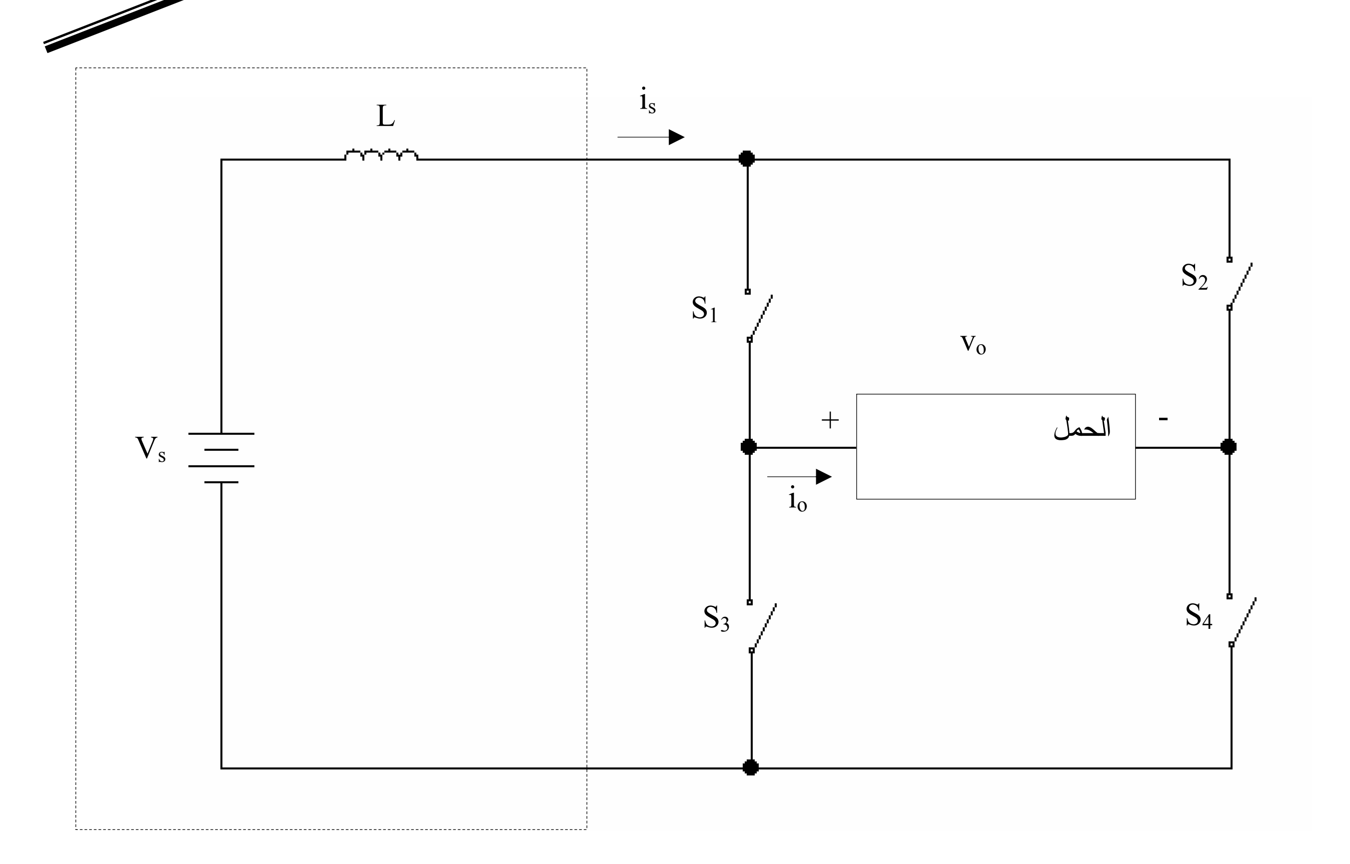
الشكل (٤ -١٢): نبضات المفتاحين S1 ,S2 والتي يمكن الحصول عليها بمقارن موجة جيبيه مرجعية وموجة مثلثية حاملة وموجة جهد خرج العاكس.

مصدر التيار العاكس Current Source Inverter CSI

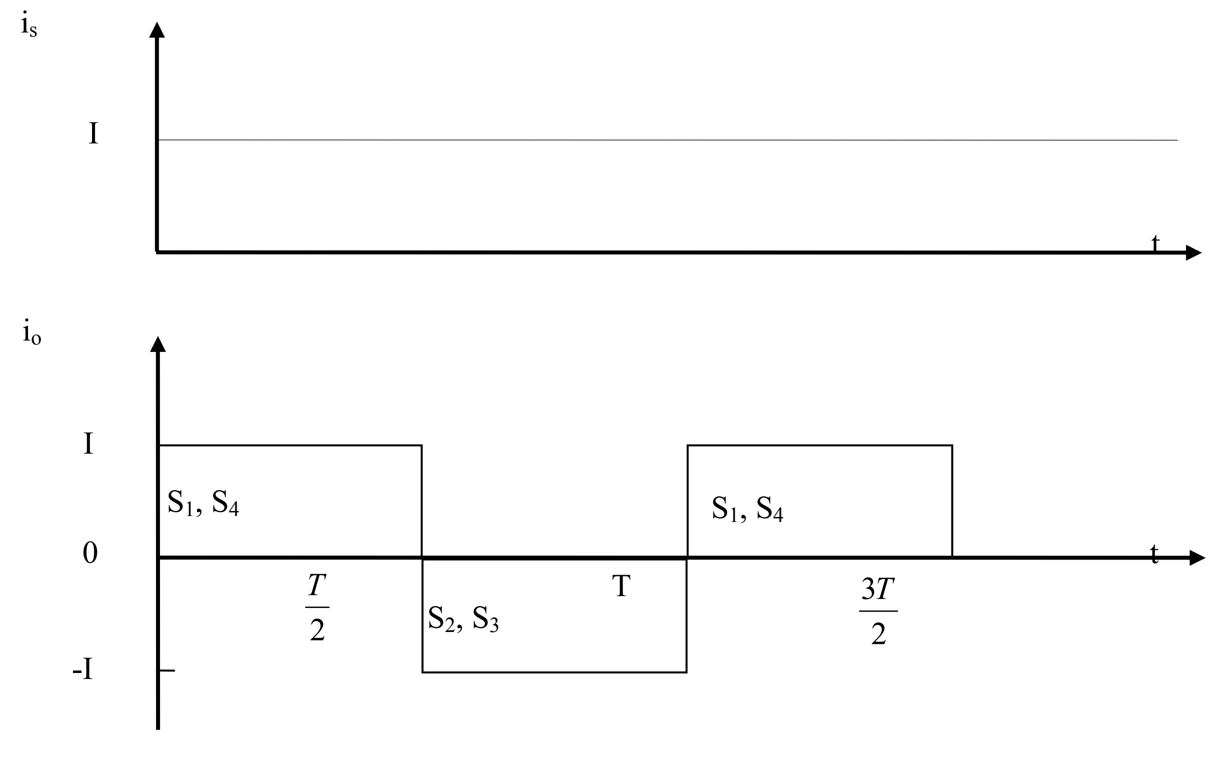
تتصل دائرة مصدر تيار العاكس بمصدر جهد ثابت مستمر وملف حثي و تكون قيمة تيار دخل العاكس أو تيار المصدر له قيمة ثابتة و لابد من المحافظة على ثبات هذه القيمة مهما يحدث من تغير في جهد مصدر جهد الدخل المستمر. يمكن إنجاز هذا عمليا بجعل قيمة الملف الحثي له قيمة حثية كبيرة ويمكن بهذه الطريقة منع حدوث أي تغير مفاجئ في قيمة تيار دخل العاكس و بالتالي يتم المحافظة على القيمة الثابتة لتيار العاكس و يحول العاكس تيار الدخل الثابت إلى تيار خرج على هيئة موجة مستطيلة.

مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور 1-Phase Current Source Bridge Inverter

يبين الشكل (٤ -١٣) دائرة مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور و نلاحظ بعدم وجود دايودات حذافة بدائرة العاكس حيث إن تيار دخل العاكس له قيمة ثابتة و يمكن إيجاز مبدأ عمل الدائرة كالتالي: يتم إعطاء نبضات لكل من المفتاحين S_1, S_4 خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ و نتيجة لوجود ملف حثي كبير متصل على التوالي مع مصدر الجهد الثابت المستمر يمر تيار ثابت القيمة خلال هذه الفترة الزمنية في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المستمر و المتصل على التوالي مع الملف الحثي L والمفتاحين S_1, S_4 و الحمل (مادي أو حثي) يتم فصل المفتاحين S_1, S_4 في نهاية هذه الفترة الزمنية حتى اللحظة الزمنية T و يتم إعطاء نبضات في نفس الوقت لكلا من المفتاحين S_2, S_3 ويمر تيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من مصدر التيار الثابت و المفتاحين S_2, S_3 الحمل و نتيجة لمرور تيار له اتجاه عكسي في الحمل خلال هذه الفترة الزمنية و بالتالي يتم الحصول على موجة مستطيلة لتيار الحمل قيمتها I خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T/2$ و قيمتها I- خلال الفترة الزمنية $T/2 \le t \le T$ و تتكرر شكل هذه الموجة كل فترة زمنية زمنها الدوري T و يمكن التحكم في قيمة تردد تيار الخرج بالتحكم في قيمة الزمن الدوري T أي بالتحكم في زمن إغلق و فصل المفاتيح الإلكترونية. يبين الشكل (٤ -١٤) موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس.



الشكل (٤ -١٣): دائرة مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور



الشكل (٤ -١٤): موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس

أسئلة و تمارين:

ت - ما هي وظيفة العاكس؟

ث - اذكر بعض التطبيقات المهمة للعواكس؟

ج - ما هي الأنواع المختلفة للعواكس؟

ح - ما هو مبدأ عمل العاكس؟

خ - ما هي الفروق بين العواكس نصف القنطرية وكاملة القنطرة؟

د - ما هي الطرق المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟

ذ - ما هي الطرق الداخلية المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟

ر - ما هو الهدف من استخدام طريقة التعديل المضاعف لعرض النبضة؟

ز - ما هو الهدف من استخدام طريقة تعديل عرض النبضة الجيبي؟

س -ما هي عيوب طريقة التحكم في جهد خرج العاكس باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة؟ كيف يمكن التغلب على هذه العيوب؟

ش -ما هو الفرق بين عاكس الجهد المستمر وعاكس التيار المستمر؟

ص - يتصل عاكس نصف قنطري أحادى الطور بمصدر جهد مستمر قيمته 220V وحمل مادي قيمته 20Ω. أوجد:

أ- القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس 'V_o'

ب- القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس والمناظر للمركبة الأولى 'V_1'

ج- قيمة القدرة المغذاة للحمل.

٤ -١٣ أعد حل السؤال السابق (سؤال ٤ -١٢) عندما يكون العاكس قنطرياً كاملاً.

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



إلكترونيات القوى

التحكم في المحرك المستمر

التحكم في المحرك المستمر

٥

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة لابد أن يكون ملمًا و مستوعبًا التالي:

- طرق التحكم المختلفة في سرعة محركات التيار المستمر وبصفة خاصة سرعة محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة
- حساب سرعة محرك التيار المستمر في حالة اللا حمل والحمل
- علاقات الجهد المتوسط لمحرك التيار المستمر مع سرعته عند قيم مختلفة لزوايا إشعال الثايرستور
- علاقات الجهد لمحرك التيار المستمر مع سرعته عند قيم مختلفة لدورة تشغيل المقطع

مقدمة:

قد تم دراسة الموحدات المحكومة ومقطعات التيار المستمر والعواكس بالوحدات السابقة في هذا الكتاب وقد تم معرفة بعض عناصر القوى والتي تمثل الجزء الرئيس في بناء دوائرهم الإلكترونية.

سوف يتم بهذه الوحدة دراسة بعض التطبيقات العملية والصناعية للموحدات المحكومة ومقطعات التيار المستمر والعواكس مثل التحكم في سرعة المحركات المستمرة والمحركات الحثية.

تأتي عملية التحكم في سرعة التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة في مقدمة التطبيقات العملية في استخدام الموحدات المحكومة سواء ذات الطور الواحد أو الأطوار الثلاثة . كما تأتي أهمية استخدام هذا النوع من المحركات لما تتميز به من سهولة التحكم فيها والمدى الواسع لهذا التحكم بالإضافة إلى سهولة كتابة النماذج الرياضية الخطية لها وكما هو معروف أن أسهل وأيسر الطرق للتحكم في سرعة محرك التيار المستمر هي التحكم في قيمة جهد عضو الاستنتاج V_a وكان ذلك يتطلب تغذية هذه المحركات من مولدات تيار مستمر ذو تغذية مختلفة للحصول على جهد مستمر متغير ولكن في الأعوام الثلاثين الماضية ومع تقدم وتطور هذه الموحدات المحكومة أمكن استبدال مولدات التيار المستمر الغالية الثمن بهذه الموحدات التي تعمل على التيار المتناوب أحادية وثلاثية الطور والتي يمكن الحصول منها على الجهد المستمر المتغير القيمة تبعا لزوايا الإشعال α.

وسنتعرض في الفقرات التالية للمعادلات الأساسية لمحرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة مع هذه الموحدات المحكومة أحادية الطور ذات الموجة.

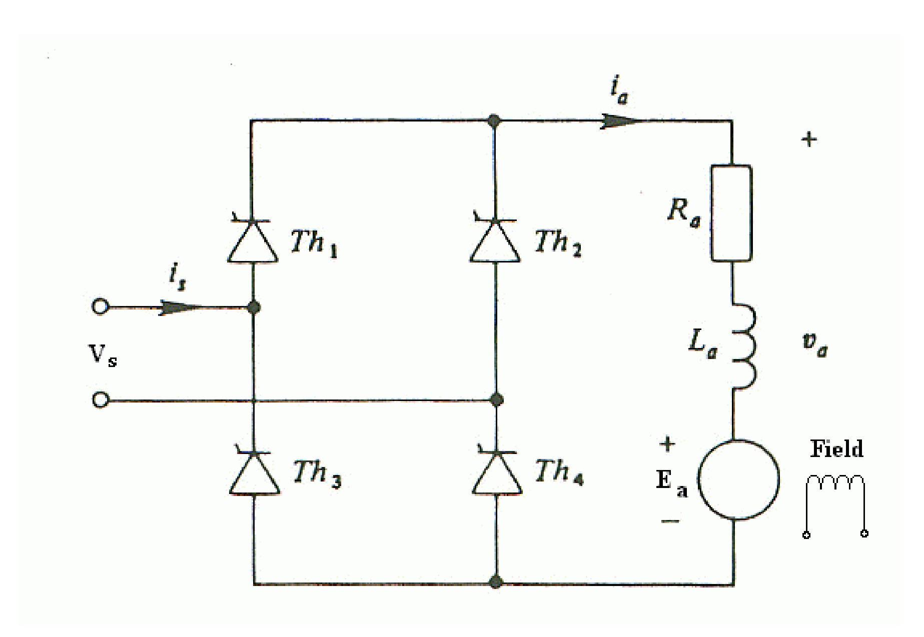
التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام الموحدات المحكومة ذات الطور الواحد

Speed Control of a DC Motor Using single-Phase Controlled Rectifiers

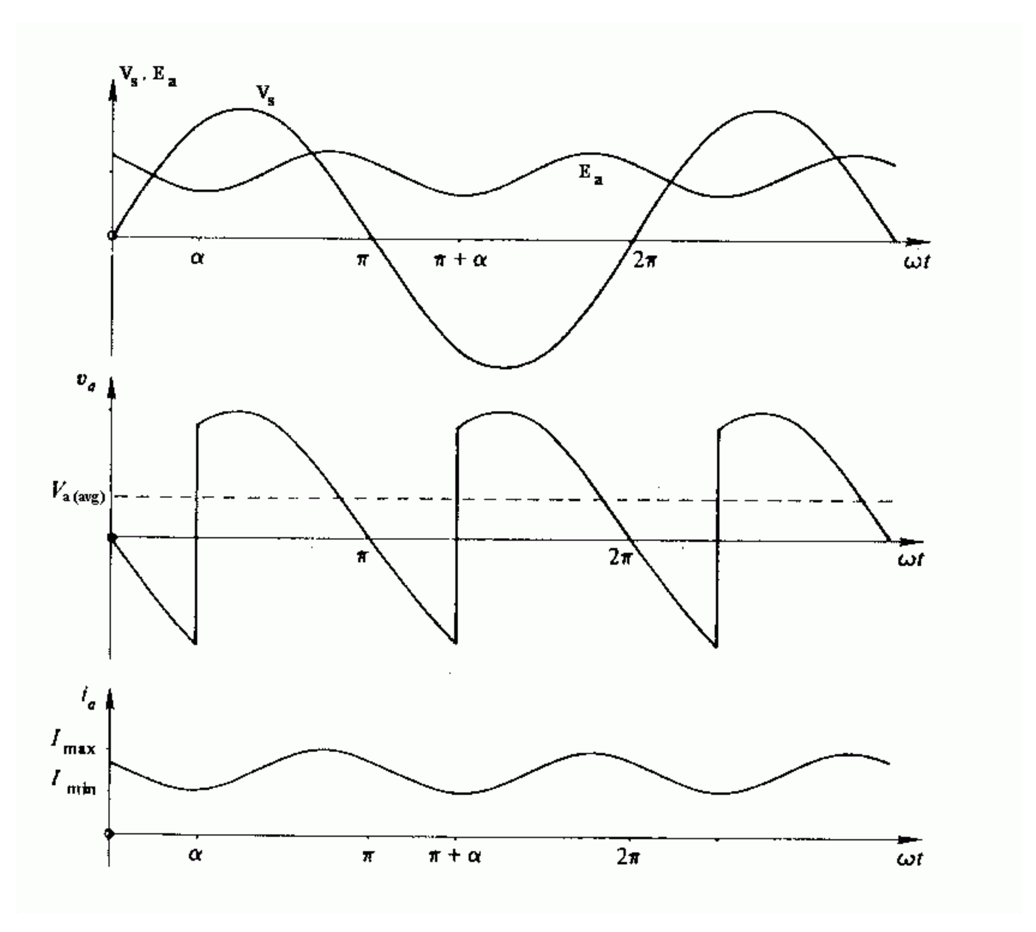
يبين الشكل (٥ -١) محرك تيار مستمر ذا التغذية المنفصلة والذي يتم تغذيته من مصدر تيار متناوب أحادي الطور مع استخدام موحد موجة كاملة محكوم. كما يبين شكل (٥ -٢) موجات الجهد V_a على أطراف المحرك والتيار المار به i_a ويلاحظ أنه نتيجة لوجود حث الملف L_a والطاقة الديناميكية في العضو الدوار بالمحرك فإن زاوية الإطفاء للثايرستور $\beta = \pi + \alpha$ وعليه فإن القيمة المتوسطة للجهد على أطراف المحرك باعتبار أن تياره متصل كما يلي:

$$V_a(\alpha) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos(\alpha) \qquad (٥ -١)$$

وهذه المعادلة قد سبق الحصول عليها بالمعادلة (٢ -٢٢) ومن هذه المعادلة نجد أن قيمة جهد التيار المستمر دالة في زاوية الإشعال α والتي يمكن أن تتغير من $\alpha = 0$ حتى $\alpha = 180^o$ ومن هذه المعادلة نجد أن قيمة الجهد $V_a(\alpha)$ موجبة دائما عندما تكون زاوية الإشعال أقل من $90°$ بينما تصبح قيمة هذا الجهد سالبة إذا كانت زاوية الإشعال أكبر من ذلك ($\alpha>90°$) ومعنى ذلك أن في الحالة الأخيرة يمكن عكس سرعة المحرك ليدور في الاتجاه العكسي أما إذا كانت $\alpha = 90^o$ فإن سرعة المحرك تصبح صفرا. نستنتج مما سبق بأنه يمكن التحكم في سرعة واتجاه دوران المحرك وذلك بالتحكم في قيمة زاوية الإشعال.



الشكل (٥ -١): محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة مع موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه



الشكل (٥ -٢): موجة كل من جهد الدخل وجهد الخرج وتيار الخرج

يمكن كتابه العلاقات الرياضية لمحرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة كالتالي:

$$V_a = E_a + I_a R_a \quad (٥ -٢)$$

$$E_a = K \Phi \omega = K_b \omega \quad (٥ -٣)$$

$$T_a = K \Phi I_a = K_T I_a \quad (٥ -٤)$$

حيث أن التغذية المنفصلة تعنى ثبوت التدفق المغناطيسي Φ وتكون القوة الدافعة الكهربية E_a متناسبة مع سرعة المحرك ω حيث إن العلاقة بين هذه السرعة الزاوية وبين سرعة عدد اللفات لكل دقيقة N هي:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (٥ -٥)$$

وتكون قيمة الثابتين المتساويين K_b, K_T متوقفة على عدد الأقطاب P و التدفق المغناطيسي Φ وعدد الموصلات Z وعدد مسارات التوازي a أو معطاة بالعلاقة:

$$K_b = K_T = \frac{PZ\phi}{2\pi a} \quad (٥ -٦)$$

ويمكن إيجاد العلاقة بين سرعة المحرك ω وعزم المحرك T_a بمعلومية جهد المحرك المستمر $V_a(\alpha)$ وذلك بالتعويض في المعادلة (٥ -٢) بالمعادلتين (٥ -٣)، (٥ -٤) وتكون العلاقة بين سرعة وعزم المحرك كالتالي:

$$\omega = \frac{V_a(\alpha)}{K_b} - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a \quad (٥ -٧)$$

ويمكن الحصول على علاقة بين سرعة المحرك وزاوية الإشعال وذلك بالتعويض من المعادلة (٥ -١) في المعادلة (٥ -٧) وتكون العلاقة بينهما كالتالي:

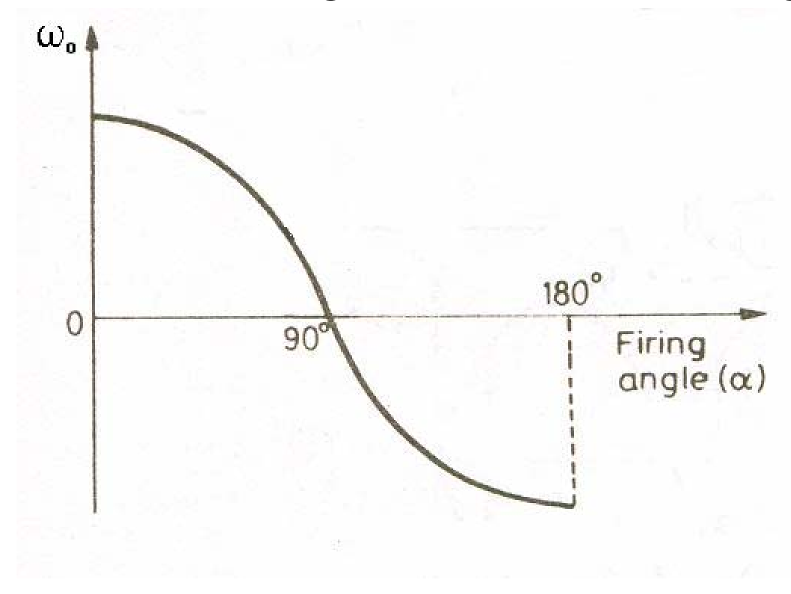
$$\omega = \frac{2\sqrt{2} V_s}{\pi K_b} \cos(\alpha) - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a \quad (٥ -٨)$$

حيث أن العزم T_a (N.m) والسرعة الزاوية ω (Rad/Sec) وفى هذه المعادلة فإن الجزء الأيسر من الطرف الأيمن يمثل سرعة المحرك عند اللا حمل بينما الجزء الأيمن من هذا الطرف يمثل النقص في السرعة والناتج من زيادة العزم على المحرك ويمكن تمثيل معادلة سرعة المحرك عند اللا حمل ω_o كالتالي:

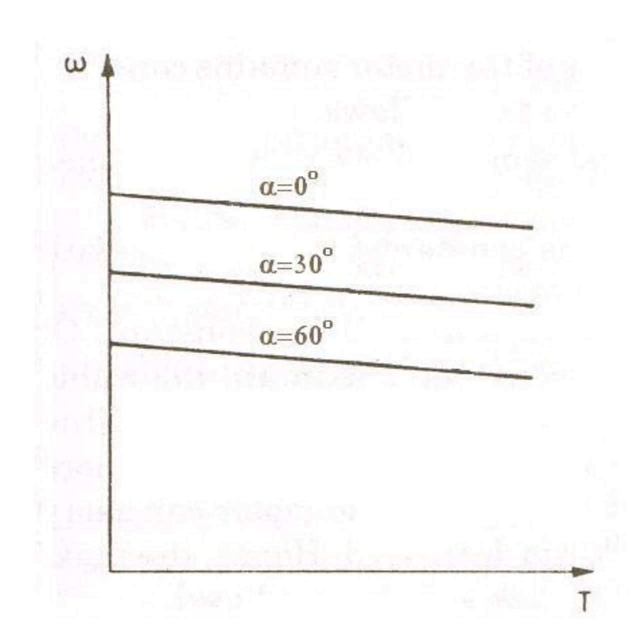
$$\omega = \frac{2\sqrt{2}V_s}{K_b}\cos(\alpha) \qquad (٥- ٩)$$

ويبين الشكل (٥ -٣) العلاقة بين سرعة اللا حمل ω_o للمحرك عند تغير زاوية الإشعال في المدى ما بين $\alpha=0$ حتى $\alpha = 180^o$ ومنها نرى أن السرعة تعكس اتجاهها عندما تكون $\alpha > 90^o$ ويمكن أن يحدث ذلك عندما يتطلب عكس سرعة المحرك . كما يبين الشكل (٥ -٤) العلاقة بين سرعة المحرك ω والعزم T_a عند زوايا مختلفة للإشعال وذلك باستخدام المعادلة (٥ -٨).

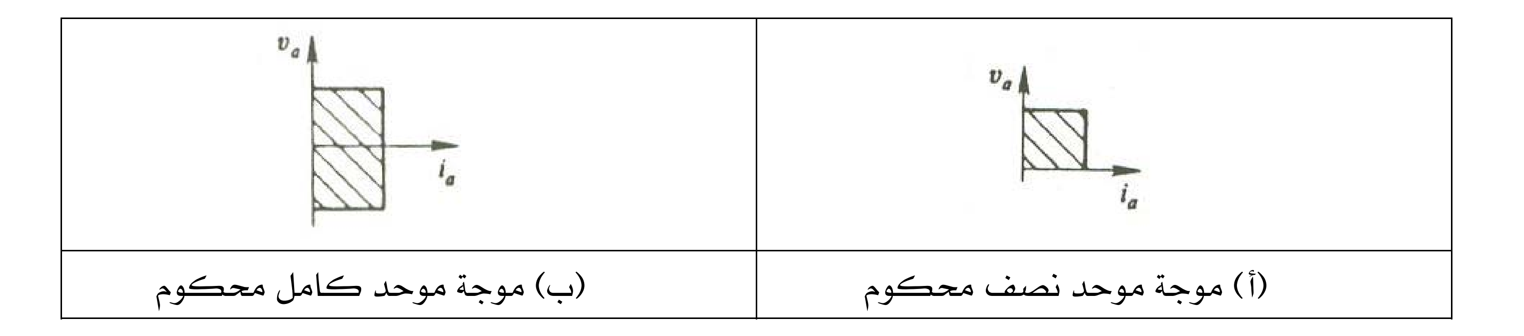
ومن الشكل (٥ -٤) نرى أنه عند زيادة السرعة مع زيادة الحمل فيجب تصغير زاوية الإشعال α. ويلاحظ عند استخدام موحدات نصف محكومة مع دايودات حذافة فإن السرعة لا يمكن تغير اتجاه دورانها ويعمل المحرك في الربع الأول فقط حيث أنه في حالة الموحد المحكوم يعمل في المربعين الأول (الدوران الموجب) والرابع (الدوران السالب) كما هو موضح بالشكل (٥ -٥).



الشكل (٥ -٣): العلاقة بين سرعة اللا حمل ω_o لمحرك التيار المستمر مع تغير زاوية الإشعال α



الشكل (٥ -٤): العلاقة بين سرعة المحرك ω مع العزم عند زوايا إشعال مختلفة



(أ) موجة موحد نصف محكوم	(ب) موجة موحد كامل محكوم

الشكل (٥ -٥): العلاقة بين الجهد والتيار المتوسط للمحرك في حالة موحد كامل محكوم ونصف محكوم

مثال (٥ -١):

محرك تيار مستمر 1200 rpm,10 HP, 230 V ذو تغذية منفصلة سرعته يمكن التحكم فيها بواسطة موحد موجة كاملة محكوم ذو طور واحد كما هو مبين بالشكل (٥ -١). تيار الحمل الكامل $I_a = 38$ A والمقاومة $R_a = 0.3\ \Omega$ وجهد المنبع $V_s = 260$ V. ثابت المحرك للجهد والعزم $K_b = K_T = 1.74$ وباعتبار أن الحث للمحرك كاف لكي يكون التيار متصلاً فأوجد عند زاوية مقدارها $\alpha = 30^o$ ما يلي:

أ - عزم المحرك عند الحمل الكامل

ب - سرعة المحرك عند الحمل الكامل

ج - معامل القدرة للمصدر.

الحل:

أ - يمكن إيجاد عزم المحرك باستخدام المعادلة (٥ -٤) كما يأتي:

$$\because T_a = K_T\, I_a$$
$$\therefore T_a = 1.74 * 38 = 66.121 \quad N.m$$

ب - يمكن إيجاد سرعة المحرك عند الحمل الكامل باستخدام المعادلة (٥ -٨) كما يأتي:

$$\omega = \frac{2\sqrt{2}\, V_s}{\pi K_b} \cos(\alpha) - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a$$
$$\therefore \omega = \frac{2\sqrt{2}\ 260}{1.74\pi} \cos(\alpha) - \frac{0.3}{1.74^2} 66.121$$
$$= 116.56 - 6.55 = 110 \quad rad/\sec$$

ويمكن إيجاد سرعة لفات المحرك باستخدام المعادلة (٥ -٥) كالتالي:

$$\because \omega = \frac{2\pi N}{60}$$
$$\therefore N = \frac{60\,\omega}{2\pi} = \frac{60 * 110}{2\pi} = 1051\ rpm$$

ج - ويمكن إيجاد معامل القدرة الكهربية عند المصدر كالتالي:

$$PF = \frac{V_a I_a}{V_s I_s}$$

بما أن قيمة التيار المتوسط للمحرك يساوي تقريبا القيمة الفعالة لتيار المنبع حيث إن تيار المحرك تقريبا ثابت ومتصل وبالتالي يمكن تعيين قيمة معامل القدرة كالتالي:

$$V_a = \frac{2\sqrt{2}V_s}{\pi} \cos(\alpha) = \frac{2\sqrt{2}*260}{\pi}\cos(30^o) = 202.82 \text{ V}$$

$$\therefore PF = \frac{V_a}{V_s} = \frac{202.82}{260} = 0.78$$

التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام مقطعات التيار المستمر

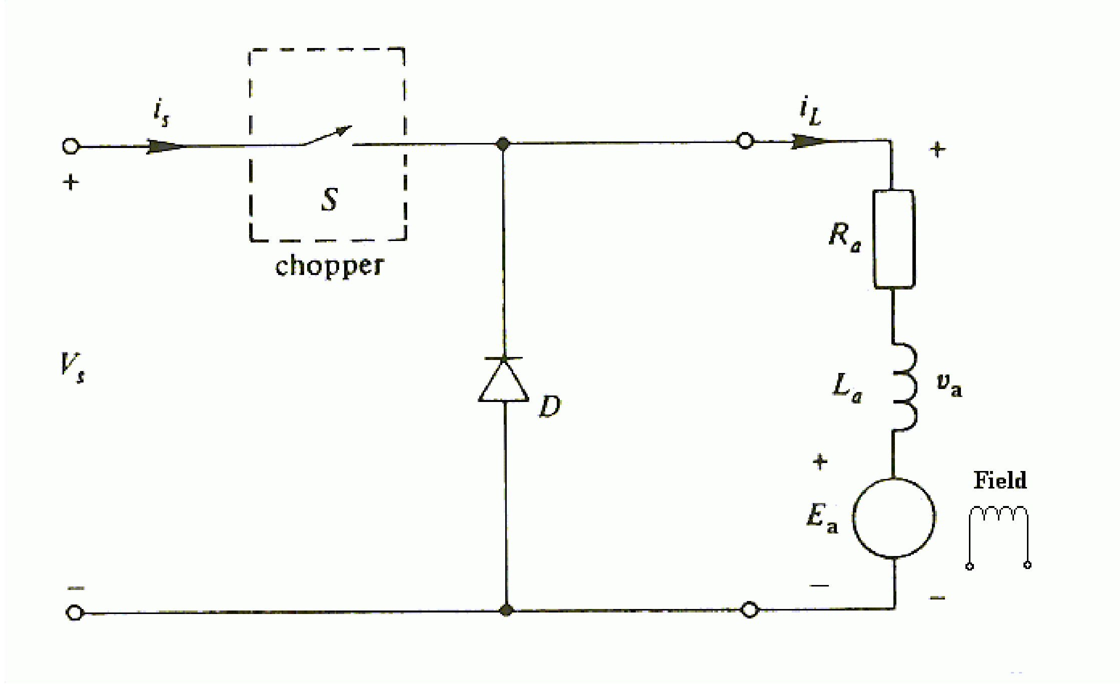
Speed Control of A DC Motor Using DC Choppers

يمكن أيضا التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام مقطع تيار مستمر كما مبين بالشكل (٥ -٦) حيث يكون خرج المقطع هو الدخل للمحرك وكما سبق دراسته بالوحدة الثالثة أن جهد خرج المقطع يتم التحكم به عن طريق التحكم في دورة تشغيل المقطع وبالتالي يتم التحكم في سرعة المحرك. يمكن استخدام جميع المعادلات من المعادلة (٥ -٢) حتى المعادلة (٥ -٩) في حالتنا هذه وتستبدل المعادلة (٥ -١) بالمعادلة الخاصة بخرج جهد مقطع التيار المستمر وهي كالتالي:

$$V_a = D V_s \qquad (٥ -٩)$$

حيث أن D هي دورة التشغيل.

يمكن أن يكون تيار المحرك متصلاً أو متقطعاً وذلك يعتمد على قيمة دورة التشغيل.



الشكل (٥ -٦): محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة مع مقطع تيار مستمر

مثال (٥ -٢):

قاطع تيار مستمر يغذي محرك تيار مستمر من جهد مصدر جهد ثابت مستمر قيمته $V_s = 150$ V.

إذا كانت ثوابت المحرك هي:

$$R_a = 0.5\ \Omega,\ L_a = 10\ \text{mH},\ K_b = 0.05\ \text{V/rpm}$$

أوجد قيمة تردد القاطع عندما يكون زمن التوصيل (T_{ON}) 1.6 ms وذلك في حالة دوران المحرك بسرعة N = 2000 rpm مع ثبوت تيار المحرك بقيمة 40 A.

الحل:

يمكن حساب قيمة جهد خرج المقطع باستخدام المعادلتين (٥ -٢) , (٥ -٣) كالتالي:

$$V_a = K_b N + R_a I_a$$

$$V_a = 0.05 * 2000 + 0.5 * 40 = 100 + 20 = 120\ \ \text{V}$$

يمكن أيضا حساب قيمة دورة التشغيل باستخدام المعادلة (٥ -١٠) كالتالي:

$$D = \frac{V_a}{V_s} = \frac{120}{150} = 0.8$$

يمكن تعيين قيمة تردد القاطع كالتالي:

$$\because D = \frac{T_{ON}}{T} = f\,T_{ON}$$

$$\therefore f = \frac{D}{T_{ON}} = \frac{0.8}{1.6 * 10^{-3}} = 500\ \ \text{Hz}$$

أسئلة و تمارين:

٥ -١ اشرح كيفية التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام الموحدات المحكومة كاملة الموجة أحادية الطور

٥ -٢ اشرح كيفية التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام مقطعات التيار المستمر الخافضة للجهد

٥ -٣ اشرح العلاقة بين سرعة محرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة و جهده المتوسط في حالة وجود أو عدم وجود حمل

٥ -٤ محرك تيار مستمر 1000 rpm,10 kW, 240 V ذو تغذية منفصلة سرعته يمكن التحكم فيها بواسطة موحد موجة كاملة محكوم ذي طور واحد كما هو مبين بالشكل (٥ -١). تيار الحمل الكامل $I_a = 51.43$ A والمقاومة $R_a = 0.45\ \Omega$ وجهد المنبع $V_s = 240$ V. ثابت المحرك للجهد والعزم $K_b = K_T = 2$ وباعتبار أن الحث للمحرك كاف لكي يكون التيار متصلاً فأوجد عند زاوية مقدارها $\alpha = 20^o$ ما يلي:

أ - عزم المحرك عند الحمل الكامل

ب - سرعة المحرك عند الحمل الكامل

ج - معامل القدرة للمصدر.

٥ -٥ قاطع تيار مستمر يغذي محرك تيار مستمر من جهد مصدر جهد ثابت مستمر قيمته $V_s = 220$ V. إذا كانت ثوابت المحرك هي:

$$R_a = 0.3\ \Omega,\ L_a = 15\ mH,\ K_b = 0.04\ V/rpm$$

أوجد قيمة تردد القاطع عندما يكون زمن التوصيل (T_{ON}) 1 ms وذلك في حالة دوران المحرك بسرعة N = 2000 rpm مع ثبوت تيار المحرك بقيمة 25 A.

الإجابات

٢-٣	$\alpha=55°, \gamma=160°, \beta=215°$
٢-٨	$V_o=148.6$ V, $I_o=3.95$ A, $P_o=778.8$ W, PF=0.9 lag
٢-٩	$V_o=148.6$ V, $I_o=2.972$ A, $I_{o(rms)}=2.972$ A, $P_o=441.6$ W, $I_{SCR(avg)}=0.99$ A, $I_{FWD(avg)}=0.99$ A
٢-١٠	$I_{Th(avg)}=2.47$ A, $I_{Th(max)}=7.43$ A, $V_{Th(max)}=311$ V, $P_o=1104$ W
٣-٨	44 V, 2.2 A, 69.6 V, 5.5 A, 242 W
٣-٩	D=0.5, $I_{s(avg)}=10$ A, $I_{s(rms)}=14.14$ A
٣-١٠	$T_{on}=0.68$ ms, $T_{off}=0.32$ ms
٣-١١	44 V, 5.5 A, 69.6 V, 5.5 A, 2.2 A, 3.3 A, 6.16 A, 4.84, 2.4 mH
٤-١٢	110 V, 99 V, 605 W
٤-١٣	220 V, 198 V, 2420 W
٥-٤	102.86 N.m, 860 rpm, 0.85
٥-٥	400 Hz

المراجع

(1) Ashfaq Ahmed : "Power Electronics for Technology", Prentice-Hall, 1999.

(2) M. H. Rashid: "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications", Second Edition, Prentice-Hall, 1993.

(3) David A. Bradley: "Power Electronics", Second Edition, Nelson Thornes, 1995.

(4) Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins: "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", Second Edition, John Wiley & Sons, 1995.

المحتويات

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS